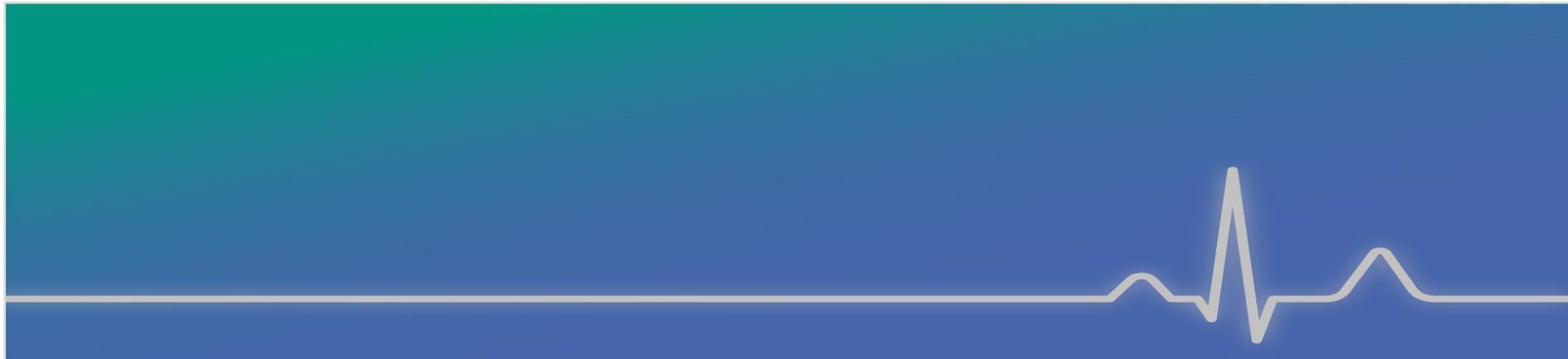


Physiologie und Anatomie I

3.4. Zellen - Zellatmung

Prof. Dr. Werner Nahm



Nach dem Studium dieses Kapitels

sollten Sie in der Lage sein

- die Zellatmung in ihren Teilschritten und in ihrer Gesamtheit darzustellen und zu erklären,
- die relevanten Reaktionsgleichungen, Stoffbilanzen und Energiebilanzen darzustellen,
- die grundlegenden Prinzipien, wie z.B. Enzymkatalyse, Transportprozesse, Redoxreaktionen, Energietransfer zu erklären.

Stoffwechsel – Definition

Aufnahme, den **Transport** und die **chemische Umwandlung** von Stoffen in einem Organismus sowie die **Abgabe von Endprodukten** an die Umgebung

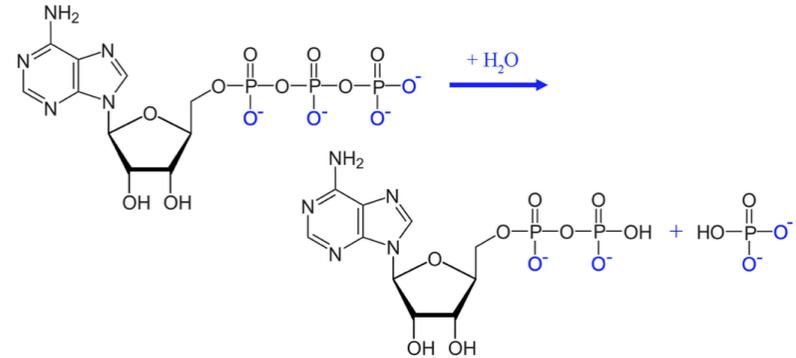
- Aufbau und Erhaltung der Körpersubstanz
- Energiegewinnung = Aufrechterhaltung der Körperfunktionen

- **Anabolismus**: Aufbauende Stoffwechselfade (Biosynthese)
- **Katabolismus**: Abbauende Stoffwechselfade
- **Intermediärstoffwechsel**: Schnittstelle (niedermolekulare Reaktionen)

Energie-Währung ATP

- **ATP (Adenosintriphosphat) ist der universelle Energieträger in allen Zellen des Organismus**
- speicherbar
- transportierbar
- enzymatisch direkt umsetzbar (Cosubstrat der Kinasen)

- Gesamtumsatz
Die tägliche Menge an ATP, die im gesamten Körper auf- und abgebaut wird entspricht beim Erwachsenen ca. die Hälfte seines Körpergewichts.



Hydrolyse von ATP:

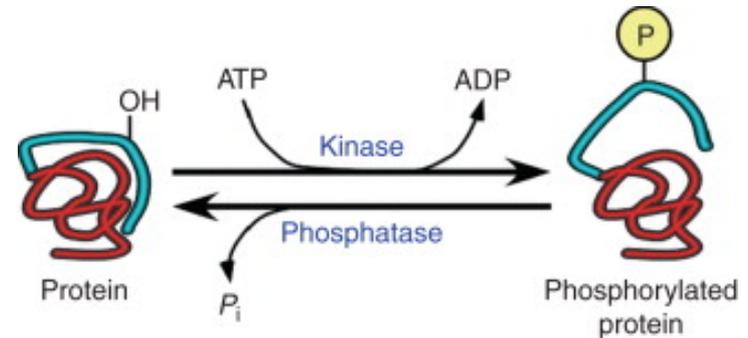
- Unter Standardbedingungen wird eine freie Energie von ca. $\Delta G = - 30 \text{ kJ/mol}$ freigesetzt.
- Unter physiologischen Bedingungen wird eine freie Energie von ca. $\Delta G = - 50 \text{ kJ/mol}$ freigesetzt.

Energie-Währung ATP

Funktionsweise von Kinasen:

- Beispiel: Proteinkinase
- Reaktion (Veresterung) einer Protein-Seitenketten—OH-Gruppe mit einer Phosphatgruppe aus dem ATP (Phosphotransferase)
- Die **Phosphorylierung** führt in der Regel zu einer Ladungsänderung und Konformationsänderung des Proteins.
- Die physiologischen Auswirkungen dieser Proteinphosphorylierungen hängen vom jeweiligen Substrat der Kinase ab.
- Bei Enzymen führt das z.B. zu Inhibition oder Aktivierung und somit zur Signalweiterleitung in der Zelle (Signaltransduktion).

- Die reverse **Dephosphorylierung** von Proteinen wird durch Phosphatasen katalysiert. Dabei wird die Phosphatgruppe freigesetzt.



Stoffwechselfvorgang, bei dem durch Oxidation organischer Stoffe (Glucose) Energie gewonnen wird. Die gewonnene Energie steht der Zelle in Form von ATP zur Verfügung.

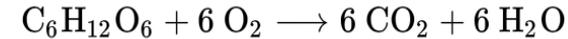
- **aerobe Atmung**

- Oxidationsmittel: NAD⁺ und Sauerstoff

- **anaerobe Atmung** (Milchsäure-Gärung)

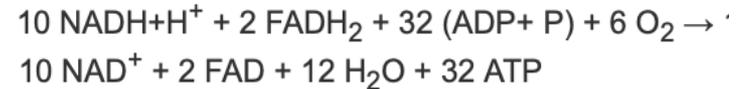
- Oxidationsmittel: nur NAD⁺
- es werden nur 2 ATP pro Glucosemolekül gewonnen.

Verbrennung von Glucose:



- Unter Standardbedingungen wird eine Energie von - **2808 kJ/mol** freigesetzt.

„Kalte“ Verbrennung von Glucose:



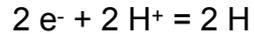
- Die Zelle gewinnt 32 ATP pro Molekül Glucose, entspricht -**1600 kJ/mol** („Wirkungsgrad“ der Zellatmung: ca 60%).
- Die restliche Energie wird als Wärme frei.

Zellatmung - Oxidation

Oxidation = Abgabe von Elektronen

In biologischen Systemen wird pro Elektron immer ein Proton mitgeführt.

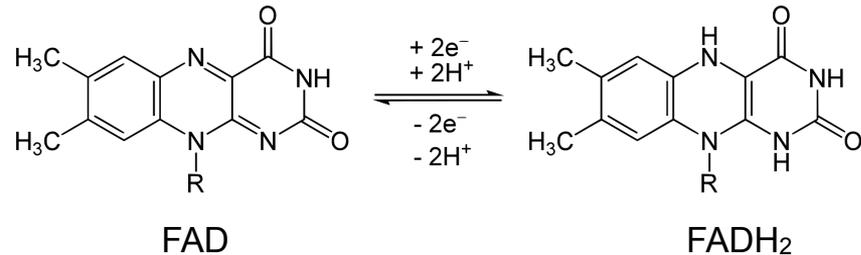
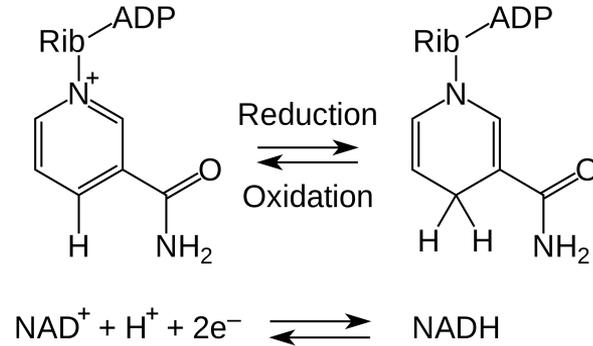
= „Abgabe von Wasserstoffatomen“



Oxidationsmittel in der Zellatmung:

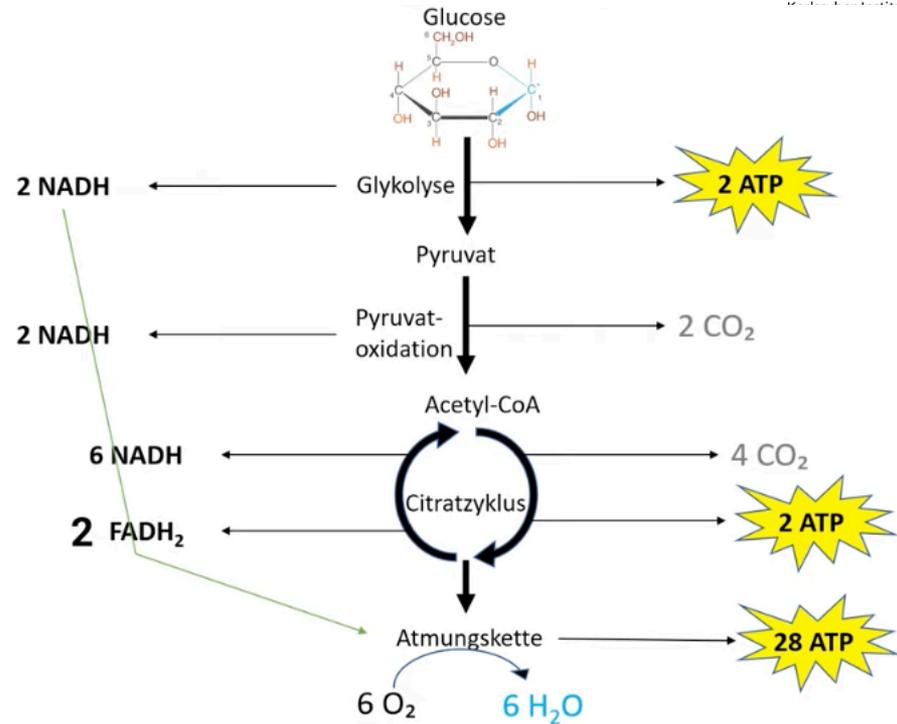
Nicotinamid-Adenin-Dinukleotid **NAD⁺**

Flavin-Adenin-Dinukleotid **FAD**



Zellatmung - Teilschritte

- Glykolyse
- Pyruvatoxidation
- Citratzyklus
- Atmungskette

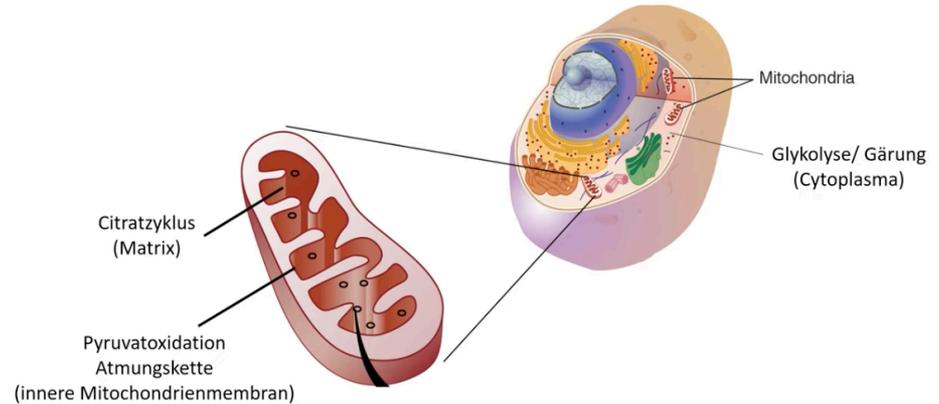


Grundprinzipien der Kompartimentierung

- Räumliche Trennung gegenläufiger Prozesse
- Aufrechterhaltung unterschiedlicher Reaktionsbedingungen
- Kopplung von Transportprozessen an Membranen

Räumliche Trennung der Teilschritte der Zellatmung

- Glykolyse: Cytoplasma
- Pyruvatoxidation: innere Mitochondrienmembran
- Citratzyklus: Mitochondrienmatrix
- Atmungskette: innere Mitochondrienmembran



Glucosequellen

Kohlenhydratverdauung

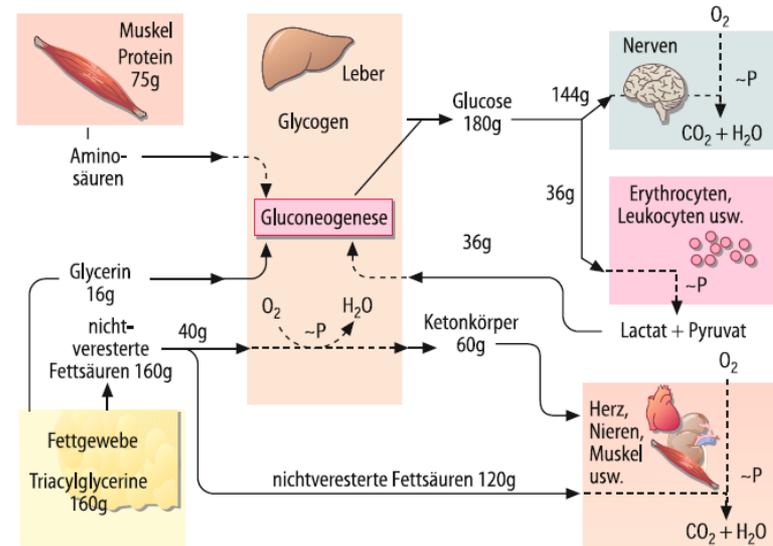
- Amylasen im Verdauungstrakt spalten Poly- und Oligosaccharide zu Monosacchariden.
- Resorption von Glucose, Galactose und Fructose durch die Darmwand
- Umwandlung von Fructose/Galactose zu Glucose

Glycogen-Abbau (Glycogenolyse)

- Glycogenspeicher in den Muskeln und in der Leber
- Enzymatischer Abbau durch Glycogen-Phosphorylase / Glucose-6-Phosphatase
- Effektive Pufferung des Blutzuckerspiegels (z.B. nachts)

Gluconeogenese

- anaboler Stoffwechselweg zur körpereigenen Synthese von Glucose für die Aufrechterhaltung des Energiestoffwechsels bei Nahrungsmangel / Fasten
- Synthese von Glucose aus 2 Molekülen Pyruvat
- Substrate zu Pyruvatsynthese:
 - Lactat
 - Glycerin (Fettabbau)
 - Aminosäuren (Proteinabbau)

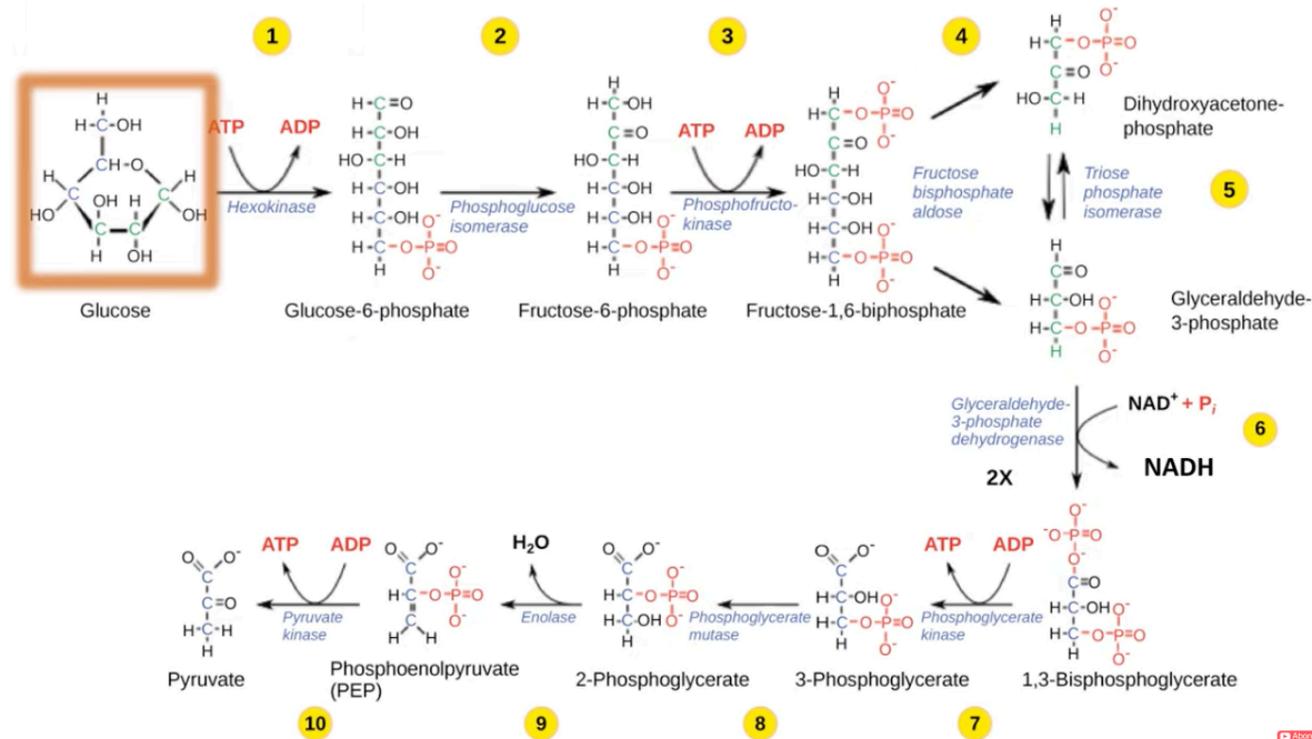


Bereitstellung von Energieträgern beim Fasten

Glykolyse

Ablauf der Glykolyse

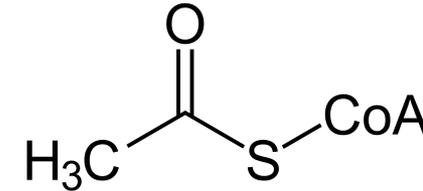
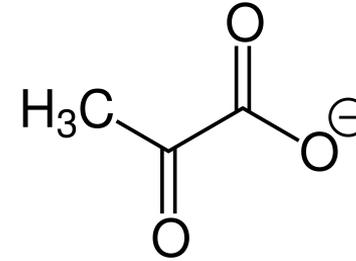
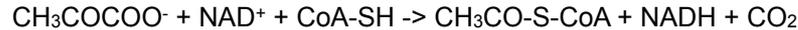
- Edukt:
 - 1 Molekül Glucose ($C_6H_{12}O_6$)
C₆-Körper
- Produkte:
 - 2 Moleküle Pyruvat (Anion der Brenztraubensäure $C_3H_3O_3^-$)
C₃-Körper
- 10 enzymkatalysierte Teilschritte
 - Schritt 1 und 3 benötigen Energie (2 ATP)
 - Schritt 7 und 10 liefern Energie (2 x 2 ATP)
 - 1 Oxidationsschritt liefert 2 x NADH
- Nettoenergiebilanz: 2 ATP
 - läuft auch unter anaeroben Bedingungen ab. NAD^+ muss dann unter Lactatbildung regeneriert werden.



Oxidative Decarboxylierung

Ablauf der Pyruvatoxidation

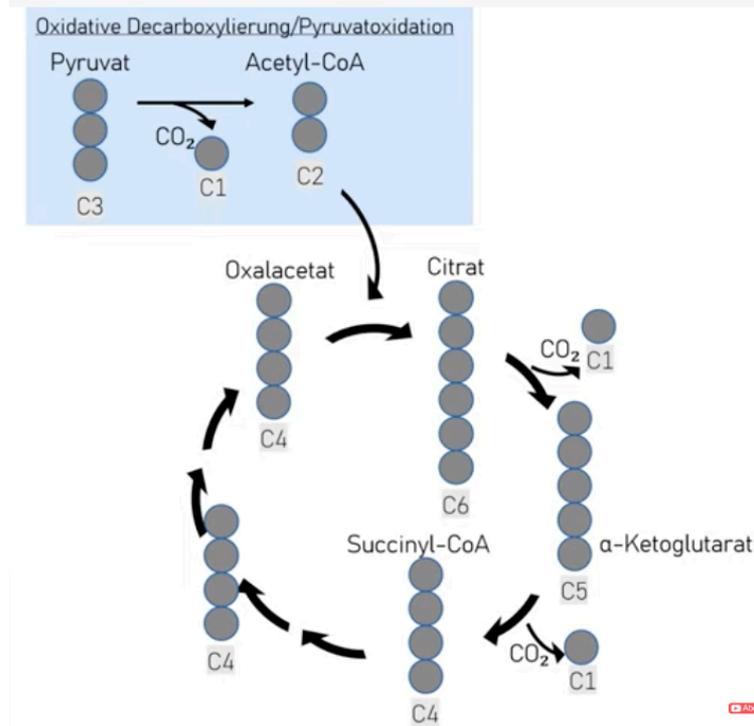
- Edukt:
 - Pyruvat ($C_3H_3O_3^-$)
 - C_3 -Körper
- Produkt:
 - Acetyl-Coenzym-A ($C_2H_3O-S-CoA$)
 - C_2 -Körper
- komplexe, enzymkatalysierte Reaktion
 - CO_2 -Abspaltung
 - CoA-SH Anlagerung (Aktivierung der Acetatgruppe)
 - der Oxidationsschritt liefert 1 NADH pro Molekül Pyruvat
- Summengleichung:



Citratzyklus

Kohlenstoffbilanz des Citratzyklus

- Die aktivierte Acetylgruppe (C₂) wird auf das Molekül Oxalacetat (C₄) übertragen und bildet Citrat (C₆).
- 2 CO₂ Moleküle werden abgespalten -> die aus dem Glucoseabbau verbliebenen Acetatmoleküle werden vollständig zu Kohlendioxid oxidiert.
- Oxalacetat wird regeneriert

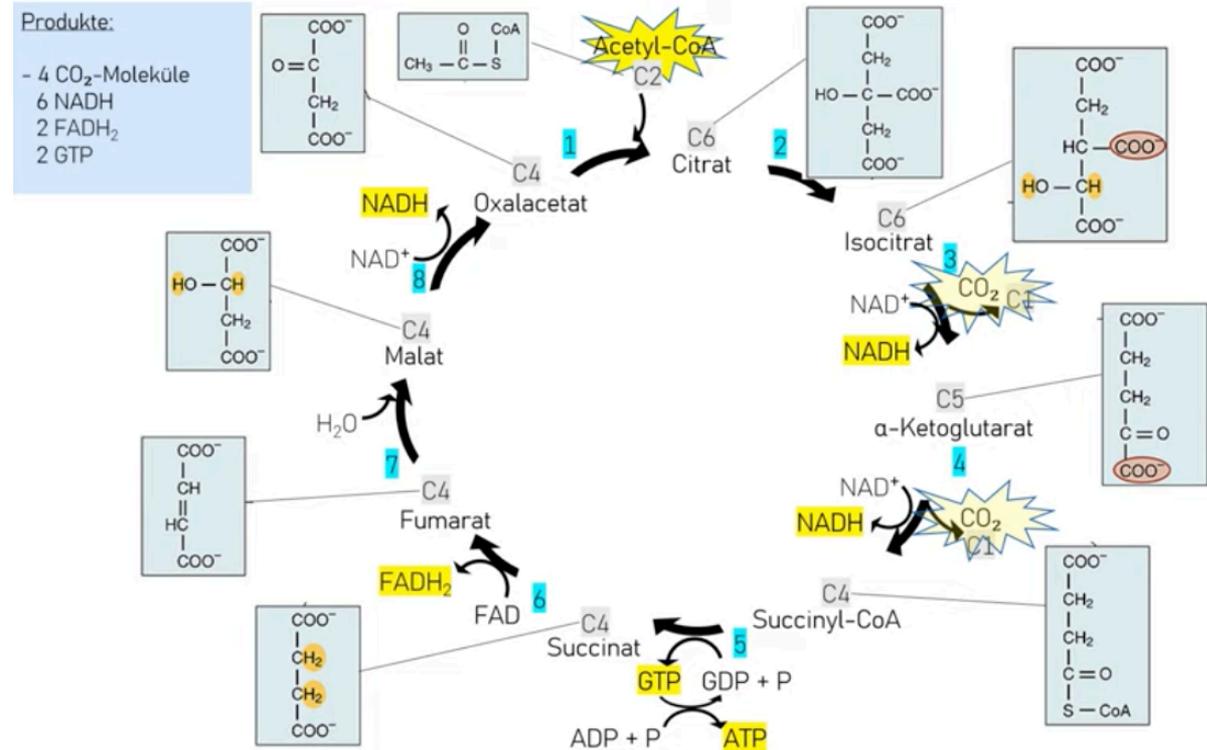


Abormen

Citratzyklus

Redox- und Energiebilanz des Citratzyklus

- Es finden überwiegend enzymkatalysierte Redoxreaktionen unter Beteiligung der Oxidationsmittel (= Elektronenüberträger) NAD^+ und FAD statt.
- pro Zyklus wird indirekt 1 ATP gebildet.
- 6 NADH und 2 FADH_2 Verbinden den Citratzyklus mit der Atmungskette
- Der Citratzyklus bildet über seine Rolle in der Zellatmung hinaus die zentrale Drehscheibe des Zellmetabolismus.
 - Bereitstellung und Aufnahme von Vorstufen oder Abbauprodukten aus anderen Stoffwechselfaden



Atmungskette

Teilschritte der Atmungskette

• Elektronentransport

Die Elektronen aus NADH und FADH₂ werden über eine Kette von Membranproteinkomplexen übertragen. Dabei werden Protonen gegen das Konzentrationsgefälle durch die innere Mitochondrienmembran aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gepumpt.

Der letzte Proteinkomplex in der Kette reduziert den Sauerstoff zu H₂O.

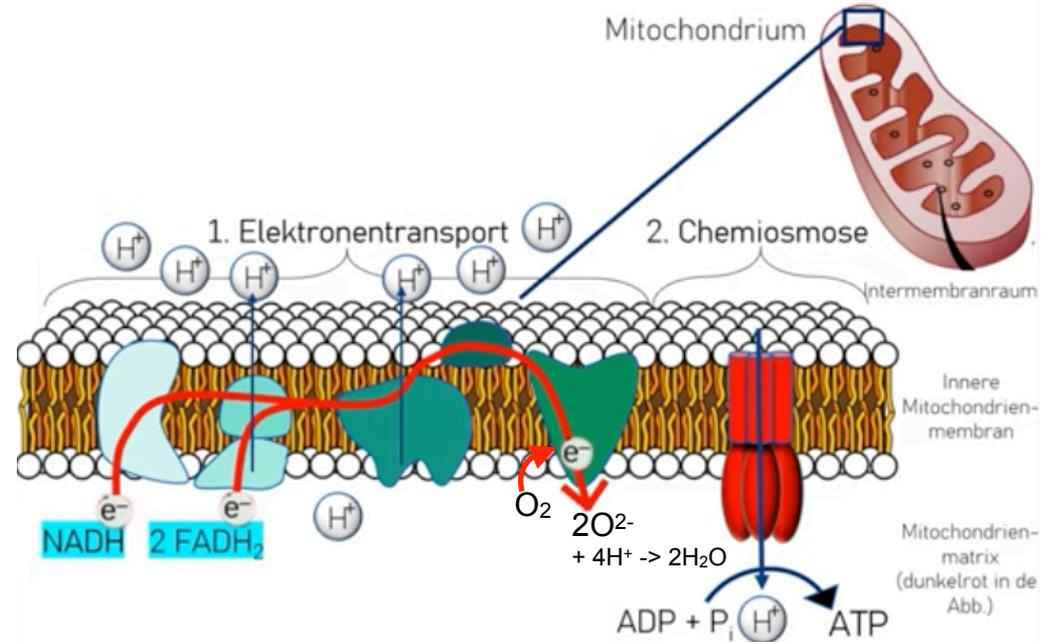
• Chemiosmose

Das Protein ATP-Synthase nutzt die protonenmotorische Kraft des elektrochemischen Protonengradienten um ADP zu ATP aufzuladen.

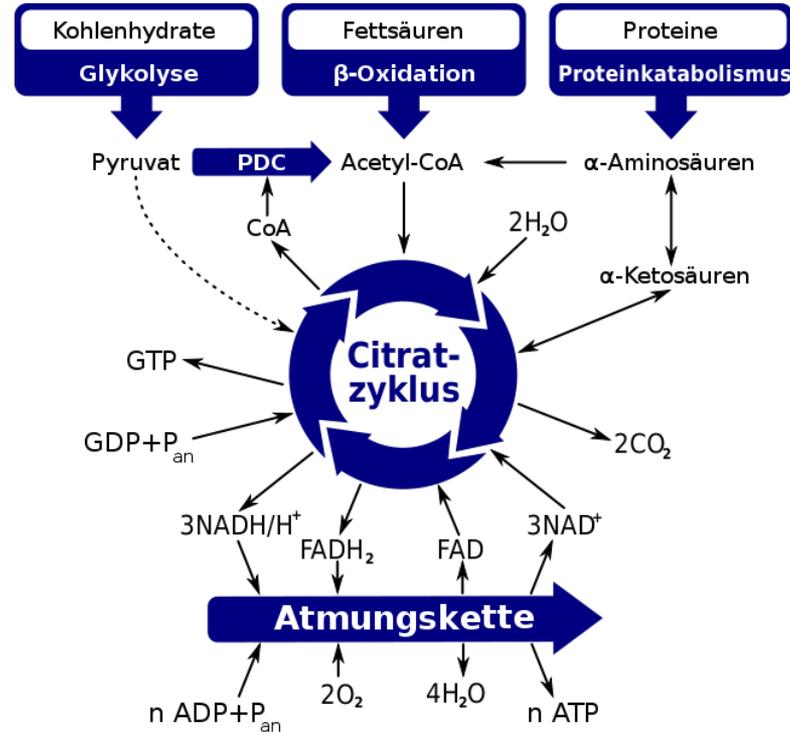
Eine ATP-Synthase produziert 100 ATP/s

Energibilanz

- 2,5 ATP / NADH
- 1,5 ATP / FADH₂
- 10 NAD + 2 FADH₂ + 28 ADP + 6 O₂
-> 12 H₂O + 10 NAD + 2 FAD + 28 ATP



Zellatmung / Schnittstellen



Bildquellen

Bücher

De Duve, Die Zelle – Expedition in die Grundstruktur des Lebens, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH & Co., 1986

Löffler, F. Biochemie kompakt, Springer, 7. Auflage, 2008

Schmidt R., et al., Physiologie des Menschen, Springer, 31. Auflage, 2010

Silverthorn D.U., Physiologie, Pearson Studium, 4. Auflage, 2009

Internetseiten

Angaben jeweils an der entsprechenden Abbildung

Lehrvideos (YouTube)

<https://youtu.be/bEV3TJTwKis>

<https://youtu.be/UTKgE2xAM84>

<https://youtu.be/jaNxYWGjgAA>

<https://youtu.be/ck6l3TcowKU>

<https://youtu.be/-rA7xHozhn4>

Alle verwendeten Abbildungen unterliegen dem Copyright des jeweiligen Autoren/Verlages.