

Endoxidation (Atmungskette, oxidative Phosphorylierung)

Endoxidation – Im letzten Abschnitt der Zellatmung, der **Endoxidation**, werden zwei Elektronen eines NADH-Moleküls auf ein Sauerstoff-Atom, O, übertragen. Mit zwei Protonen aus dem umgebenden Medium entsteht ein Wasser-Molekül, H_2O .

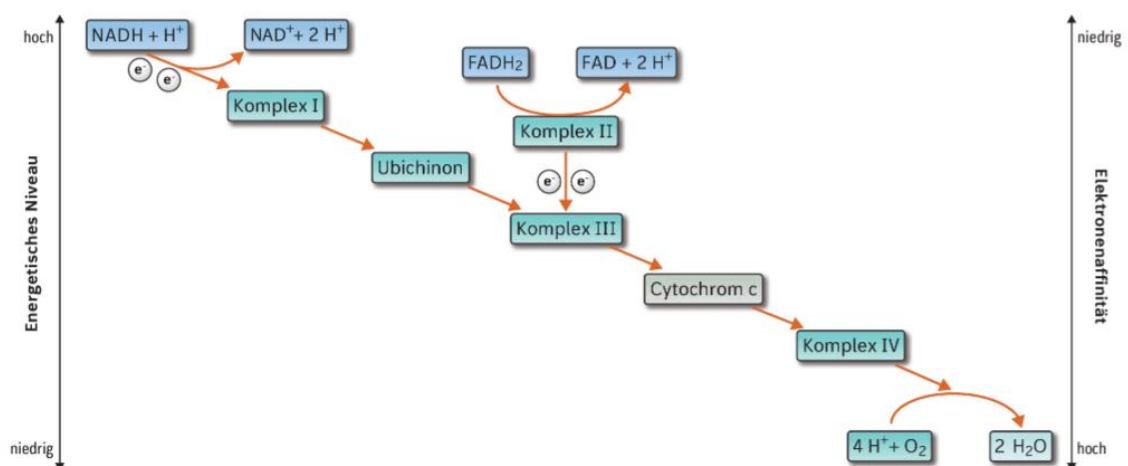
Die Reaktion erfolgt jedoch mit einem O_2 -Molekül. Es werden also vier Elektronen aus zwei NADH-Molekülen übertragen. Mit vier H^+ -Ionen entstehen zwei H_2O -Moleküle. Die Elektronenübertragung findet immer zwischen zwei Reaktionspartnern statt, denn die Elektronen sind immer an Atome gebunden. Sie ist möglich, da das Sauerstoff-Atom ein höheres Bestreben hat Elektronen aufzunehmen als NADH, seine **Elektronenaffinität** ist höher. Die Elektronenübertragung erfolgt freiwillig immer nur vom energetisch höheren zum niedrigeren Niveau. Das elektronenabgebende Molekül ist der Elektronendonator. Durch die Elektronen-Abgabe wird es oxidiert. Das elektronenaufnehmende Molekül, ist der Elektronenakzeptor. Durch die Aufnahme der Elektronen wird es reduziert.

Energetisches Modell – Bei der Elektronenabgabe vom NADH auf Sauerstoff wird formal ein Energiebetrag von 218 kJ freigesetzt. Dieser hohe Energiebetrag würde die Zelle zerstören. Die Energie wird jedoch schrittweise freigesetzt. Dies wird ermöglicht durch eine Reihe von miteinander gekoppelten Elektronendonatoren und Elektronenakzeptoren, die

als **Elektronentransportkette** fungieren. NADH gibt seine Elektronen an den Enzymkomplex I ab, da er auf einem niedrigeren energetischen Niveau liegt. Der Komplex wird mit der Aufnahme der Elektronen reduziert.

Nun werden zwei Elektronen vom Komplex I auf das Ubichinon übertragen. Ubichinon liegt wiederum auf einem niedrigeren energetischen Niveau als Komplex I. Komplex I wird dabei oxidiert und kann wieder zwei Elektronen aufnehmen. Ubichinon wird durch die Elektronenaufnahme reduziert. Es gibt jetzt seinerseits zwei Elektronen an den Komplex III ab, welcher dabei reduziert wird. Dieser überträgt die Elektronen auf Cytochrom c, welches zwei Elektronen an den Komplex IV weitergibt. Komplex IV überträgt schließlich zwei Elektronen auf den Endakzeptor Sauerstoff.

Das während des Citratzyklus entstandene FADH_2 -Molekül liegt auf einem energetischen Niveau zwischen Komplex I und Ubichinon. Es ist ebenfalls ein Reduktionsäquivalent für zwei Elektronen und überträgt diese auf den Komplex II. FADH_2 wird dabei zu FAD oxidiert. Komplex II gibt wiederum zwei Elektronen an Ubichinon weiter. Von hier aus nehmen die Elektronen denselben Weg wie beschrieben.



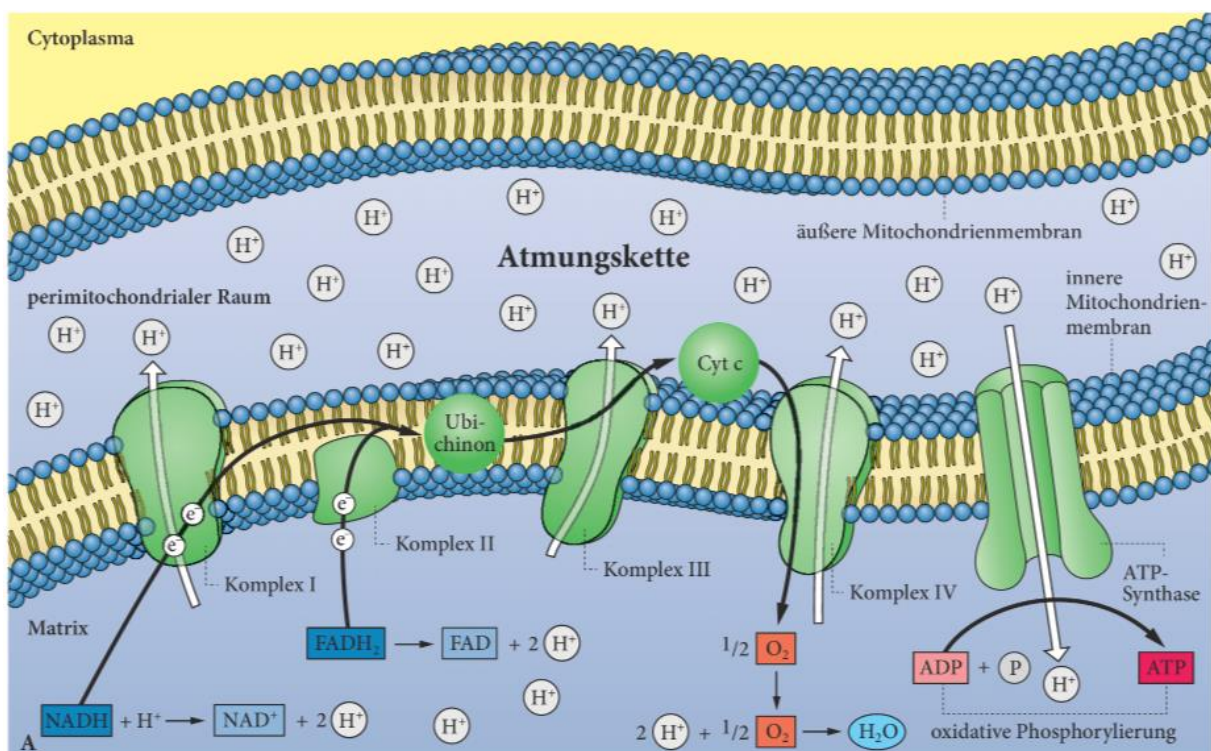
Die während des Citratzyklus gebildeten NADH-Moleküle tragen einen großen Teil der chemischen Energie aus den abgebauten Glucose-Molekülen. Die Energie ist in den Elektronenpaarbindungen enthalten. Während der Weitergabe von Elektronen durch die Elektronentransportkette wird bei jeder Übertragung ein Teil der Energie freigesetzt.

Die bei der Übertragung zweier Elektronen vom NADH auf den Komplex I freigesetzte Energie ermöglicht es dem Proteinkomplex, vier Protonen aus der Matrix in den Intermembranraum zu transportieren. Der Transport erfolgt entgegen dem Konzentrationsgefälle und kann daher nur unter Aufwendung von Energie aus der Elektronentransportkette ablaufen. Der Protonengradient zwischen Intermembranraum und Matrix wird so aufgebaut und erhalten. Auch die Komplexe III und IV transportieren Protonen in den Intermembranraum. Deren Transport wird ebenfalls durch die beim Elektronentransport freigesetzte Energie ermöglicht.

Chemiosmose — Durch den Protonengradienten entsteht ein osmotischer Druck, weil die Membran für H^+ -Ionen nicht permeabel ist. Die Protonen diffundieren deshalb entlang des Konzentrationsgefälles durch ein Transmembranprotein zurück in die Mitochondrienmatrix. Dieses Protein ist Teil der ATP-Synthase. Diese produziert beim Durchfluss der H^+ -Ionen ATP aus ADP und P_i . Der Fluss der Protonen wird als **protonenmotorische Kraft** bezeichnet.

Elektronentransportkette und ATP-Produktion sind miteinander gekoppelt. Da hier Prozesse der Redoxchemie und der Osmose beteiligt sind, heißt der Vorgang **Chemiosmose**.

Kopplung von Atmungskette und oxidativer Phosphorylierung



Für die Bilanz der Endoxidation wird angenommen, dass für jedes $\text{NADH} + \text{H}^+$ drei ATP-Moleküle und für jedes FADH_2 zwei ATP-Moleküle gebildet werden.

Dadurch ergibt sich für die Endoxidation folgende Energiebilanz:



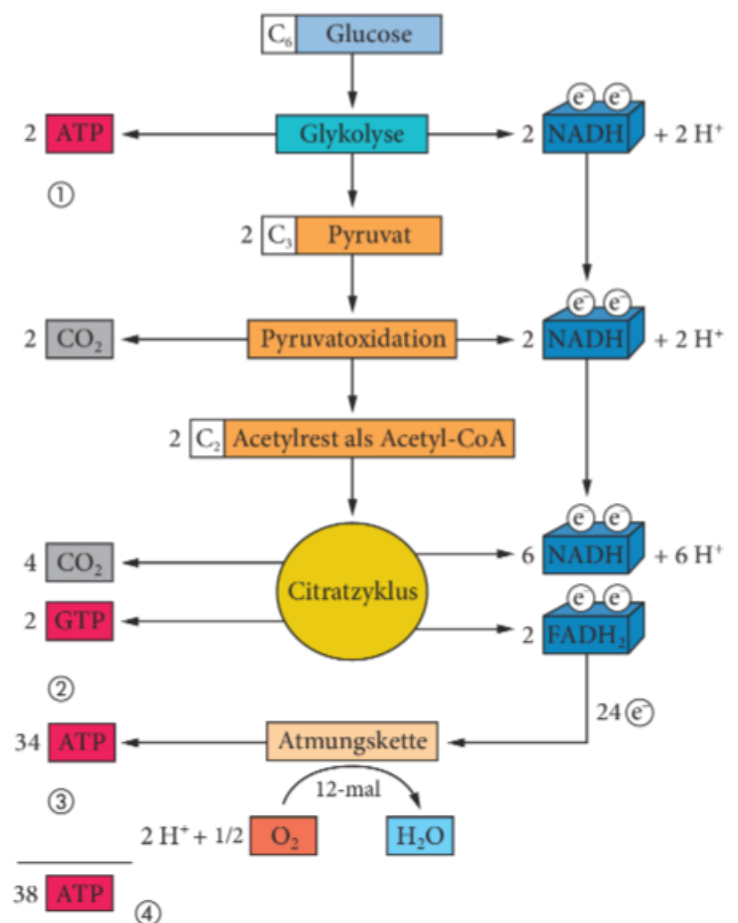
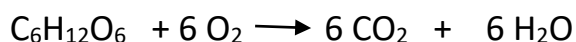
Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Bedeutung der Oberflächenvergrößerung der inneren Mitochondrienmembran.
2. Erklären Sie, welches der beiden Endprodukte der Zellatmung, CO_2 oder H_2O , den eingeatmeten Sauerstoff enthält.

Die Gesamtenergiebilanz der Zellatmung

Die **Energiebilanz** der Zellatmung ergibt sich daher pro Mol Glucose wie folgt (Abb. 133.2): Bei der Glykolyse werden netto 2 Mol ATP ① gebildet. Im Citratzyklus kommen 2 Mol GTP ② hinzu. Die Atmungskette und oxidative Phosphorylierung ergeben aus 2 Mol FADH_2 und 10 Mol $\text{NADH} + \text{H}^+$ 34 Mol ATP ③. Insgesamt werden somit pro Mol Glucose 38 Mol ATP gebildet ④. Durch energieverbrauchende Transportvorgänge an den Membranen ist die ATP-Ausbeute aber geringer.

Summengleichung der Zellatmung:



133.2 Energiebilanz der Zellatmung