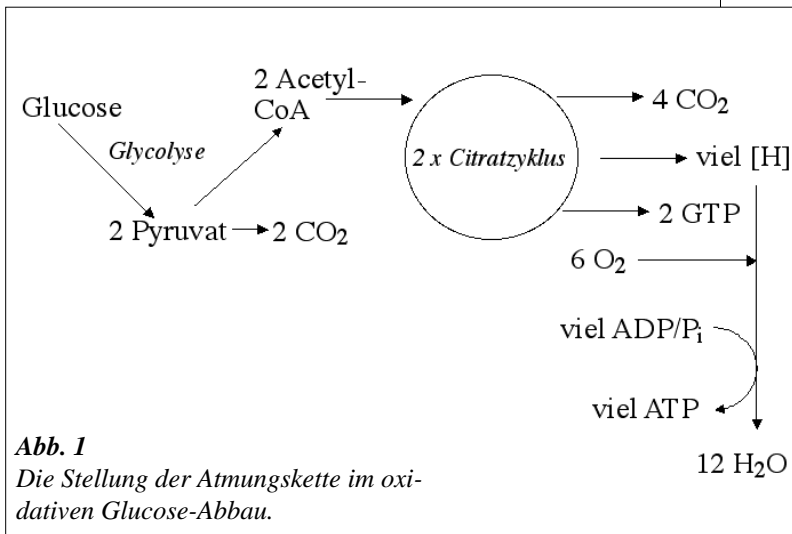


# Die Atmungskette

Die Atmungskette ist der letzte Schritt des Glucose-Abbaus. In der Glycolyse wird die Glucose in zwei Moleküle Pyruvat zerlegt, dabei werden 2 ATP pro Glucose-Molekül gewonnen. Im Anschluss daran findet der Citratzyklus statt, dessen Endprodukt die Reduktionsäquivalente  $\text{NADH}/\text{H}^+$  und  $\text{FADH}_2$  sind. Diese als Wasserstoff-

überträger fungierenden Coenzyme geben ihren Wasserstoff dann in der Atmungskette an Sauerstoff ab, es findet praktisch eine Knallgasreaktion statt, die sehr exotherm abläuft. Die dabei frei werdende Energie wird zur Gewinnung von ATP eingesetzt, welches dann das eigentliche Endprodukt des Glucose-Abbaus ist.



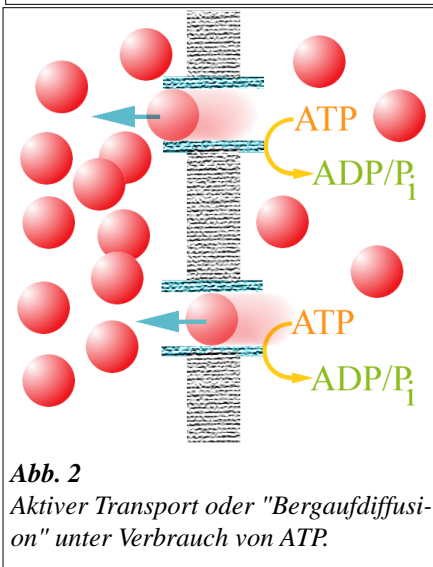
Lassen wir einen solchen aktiven Transport doch einfach einmal umgekehrt ablaufen: Es herrscht ein Konzentrationsgefälle von links nach rechts, und die Teilchen diffundieren in Richtung dieses Gefälles. Wenn zum Bergauftransport Energie in Form von ATP benötigt wurde, müsste jetzt eigentlich Energie in Form von ATP freigesetzt werden.

## ATP-Synthese während der Atmungskette

Die eben beschriebene Art und Weise der ATP-Synthese findet an der inneren Membran der Mitochondrien statt (Abb. 4). In dem Raum zwischen den beiden Membranen, dem Membranzwischenraum, herrscht normalerweise eine hohe Konzentration an Protonen, im Inneren des Mitochondriums, in der Matrix, dagegen eine niedrige Konzentration. Die Protonen diffundieren also aus dem Zwischenraum nach innen und passieren dabei den großen Enzymkomplex **ATP-Synthase**. Dieses Enzym stellt auf die eben beschriebene Art aus ADP und Phosphat das ATP her.

Leider gibt es ein kleines Problem bei diesem Mechanismus: Wenn dauernd Protonen in den Mitochondrium-Innenraum einströmen, kommt es mit der Zeit zu einem Konzentrationsausgleich. Dann könnte aber kein ATP mehr hergestellt werden.

Die Lösung dieses Problems ist ganz einfach: Es müssen neue Protonen aktiv in den Membranzwischenraum transportiert werden, jedoch darf bei diesem Transport kein ATP verbraucht werden.



## Grundprinzip der ATP-Synthese

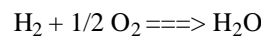
Schauen wir uns zunächst einmal einen bekannten Prozess an, den "aktiven Transport" (Abb. 2): Auf der linken Seite der Membran befinden sich viele Teilchen, es herrscht eine hohe Konzentration. Auf der rechten Seite ist die Konzentration nicht so hoch. Es besteht also ein **Konzentrationsgefälle** von links nach rechts. An sich würden jetzt die Teilchen in Richtung dieses Konzentrationsgefälles diffundieren. Sollen sie dagegen von rechts nach links transportiert werden, "bergauf" sozusagen, so geht das nur unter **Verbrauch von Energie**.

Die Hauptenergiequelle für solche Prozesse ist in der Zelle das ATP, eine energiereiche chemische Verbindung. Das ATP wird in die Bestandteile ADP und Phosphat gespalten, und die dabei freigesetzte Energie wird zum Bergauftransport der Teilchen benutzt.

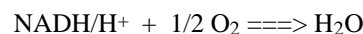
Zwei verschiedene Strategien haben die Lebewesen entwickelt, um den erforderlichen Protonentransport anzutreiben. Die grünen Pflanzen und Bakterien setzen die Energie des Sonnenlichts ein, und die heterotrophen Lebewesen (Bakterien, Pilze, Tiere) lassen eine chemische Reaktionen ablaufen, um die benötigte Energie zu gewinnen, die Knallgasreaktion.

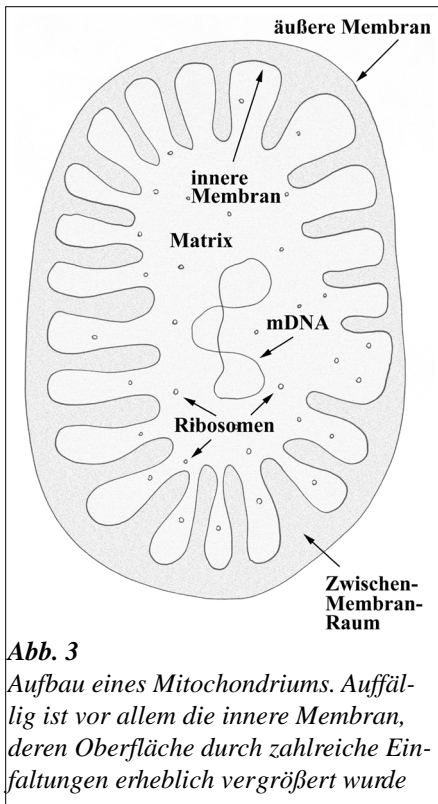
## Die Knallgasreaktion

Bei dieser Reaktion vereinigen sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser:



Dabei wird sehr viel Energie frei. In der Zelle kann kein gasförmiger Wasserstoff existieren, weil dieser sofort durch Diffusion die Zelle verlassen würde. Die Zelle speichert Wasserstoff daher mit Hilfe von Coenzymen wie NAD, NADP oder FAD. Die Reaktion dieser Coenzyme mit Sauerstoff sieht aber fast so ähnlich aus wie die Knallgasreaktion:



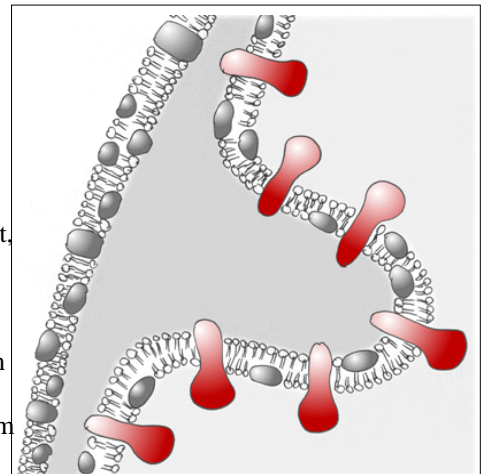


**Abb. 3**  
Aufbau eines Mitochondriums. Auffällig ist vor allem die innere Membran, deren Oberfläche durch zahlreiche Einfaltungen erheblich vergrößert wurde

Bei dieser Reaktion werden zwei Elektronen und zwei Protonen vom NADH/H<sup>+</sup> auf den Sauerstoff übertragen. Leider ist diese Reaktion derart exotherm, dass quasi die ganze Zelle explodieren würde, wenn sie in einem Schritt abliefe. Sie muss daher in mehrere harmlose Teilschritte zerlegt werden. Damit wären wir bei der

In einem Mitochondrium befinden sich in der Innenmembran solche organische Verbindungen, die in der Lage sind, Elektronen aufzunehmen und auch wieder abzugeben.

Das NADH/H<sup>+</sup> gibt seine zwei Elektronen zunächst an ein Chinonmolekül ab. Dabei wird etwas Energie freigesetzt, die zum aktiven Transport eines Protons genutzt werden kann. Vom Chinon wandern die Elektronen zum Cytochrom b. Der Redoxpotentialunterschied zwischen Chinon und Cyt b ist nicht



**Abb. 4**  
Die innere Mitochondrienmembran mit ihren vielen ATP-Synthase-Molekülen.

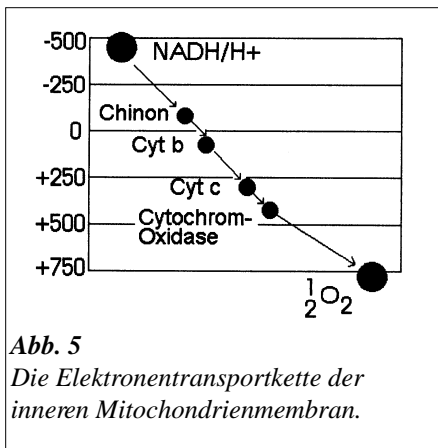
sehr groß und reicht nicht aus, um ein Proton zu transportieren. Aber die nächste Reaktion - Elektronentransport vom Cytochrom b zum Cytochrom c - ist wieder recht energiereich. Auch der letzte Elektronentransfer von der Cytochromoxidase zum Sauerstoff ist energiereich genug für einen Protonentransport. Insgesamt kommen drei Schritte in dieser Elektronentransportkette vor, die energiereich genug sind, um ein Proton von der Innenseite auf die Außenseite des Mitochondriums zu transportieren. In Wirklichkeit ist die Elektronentransportkette noch komplizierter aufgebaut. So können einige der beteiligten Komponenten direkt Protonen von innen nach außen transportieren, andere nur indirekt.

## Elektronentransportkette

Kann man die Knallgasreaktion in mehrere harmlose Schritte zerlegen?

Wer sich etwas mit Redoxchemie auskennt, weiß, dass die unedlen Metalle (Natrium, Magnesium) gern Elektronen abgeben während die Edelmetalle wie Silber und Gold

ihre Elektronen lieber behalten. Man sagt dann: Natrium und Magnesium haben ein sehr hohes (negatives) Redoxpotential, und Gold und Silber haben ein sehr niedriges (positives) Redoxpotential. Auch viele organische Verbindungen können Elektronen abgeben. Manche leichter, manche nicht so leicht, so dass man unterschiedliche Redoxpotentiale messen kann.



**Abb. 5**  
Die Elektronentransportkette der inneren Mitochondrienmembran.

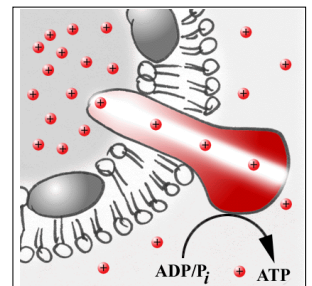
unterschiedliche Redoxpotentiale messen kann.

Betrachten wir nun einmal die Abb. 5.

Auf der Y-Achse ist das **Redoxpotential** aufgetragen. Wir sehen, dass zwischen NADH/H<sup>+</sup> und Sauerstoff ein sehr großer Unterschied im Redoxpotential besteht. Daher würde sehr viel Energie frei, wenn die Elektronen direkt vom NADH/H<sup>+</sup> auf den Sauerstoff übertragen würden. Der Stoff Chinon hat dagegen ein Redoxpotential, welches nur etwas unter dem von NADH/H<sup>+</sup> liegt. Bei einem Elektronentransport vom NADH/H<sup>+</sup> zum Chinon würde also wesentlich weniger Energie freigesetzt.

## Zusammenfassung

Bei der Atmungskette findet ein umgekehrter aktiver Transport statt: durch das passive Einströmen von Protonen in das Mitochondrium wird ATP synthetisiert. Das dazu notwendige Protonengefälle kann nur durch ständiges Hineinpumpen neuer Protonen in den Membranzwischenraum aufrechterhalten werden. Die dazu erforderliche Energie wird durch eine exotherme chemische Reaktion geliefert, der Reaktion von NADH/H<sup>+</sup> mit Sauerstoff. Bei dieser Reaktion werden zwei Protonen und zwei Elektronen vom NADH/H<sup>+</sup> auf den Sauerstoff übertragen. Allerdings ist diese Reaktion zu energiereich für die Zelle und muss daher in mehrere harmlose Teilschritte zerlegt werden (Elektronentransport-Kette).



**Abb. 6**  
Die ATP-Synthase stellt neues ATP her. Für die Synthese von 1 ATP müssen ca. 3 Protonen durch das Enzym strömen.