

## Biochemie-Seminar: Atmungskette (= Elektronentransportkette) Katharina Duchatsch

Wasso Dimitriou

1. **Einleitung**
2. Enzyme und Coenzyme der Atmungskette
3. Redoxpotentiale der Enzyme der Atmungskette
4. Enzymkomplexe
5. Ablauf (Abbildung)
6. Oxidative Phosphorylierung
  - 6a. Protonengradient
  - 6b. ATP-Synthese
  - 6c. ATP-Synthase = Komplex V
7. Hemmung/ Entkopplung

### 1. Einleitung:

Definition: Die Atmungskette ist die einzig biolog. verwirklichte Methode, Stoffwechselenergie in größten Umfang nutzbar zu machen.

Die Atmungskette ist ein hochkompliziertes Multienzym- und Protonentransportsystem, das in der inneren Mitochondrienmembran lokalisiert ist. Die Mitochondrien werden von zwei Membranen umhüllt, von denen die innere Membran die wichtigste ist. Sie stellt nämlich die Permeabilitätsbarriere dar, sie ist Sitz von Transportsystemen und der Atmungskette und der mitochondrialen ATP-Synthese.

Das Prinzip der Energiegewinnung in biologischen Systemen besteht in der schrittweisen Oxidation der verschiedenen Intermediärprodukte (Substrate) der Glykolyse, der  $\beta$ -Oxidation von Fettsäuren, Aminosäureabbau usw.. (Substrate des Stoffwechsels sollen nicht umsonst produziert werden)

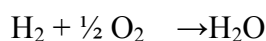
Der 1. Schritt einer biologischen Oxidation ist immer eine Dehydrierung, bei der verschiedene Substrate  $H^+$  aufnehmen können ( $NAD^+$ ,  $FAD^+$ ,  $NADP^+$  usw.)

Dies geschieht bei den katabolen (abbauenden) Stoffwechselwegen, wie z.B. Glykolyse,  $\beta$ -Oxidation von Fettsäuren usw.. Der dabei freigesetzte Wasserstoff bzw. seine Elektronen werden von einer Serie hintereinander geschalteter Enzymkomplexe übertragen.

In der Endphase erst wird der Substratwasserstoff zu Wasser oxidiert, der vorher von Dehydrogenasen auf  $NAD^+$  bzw.  $FAD$  übertragen wurde.

Diese Reaktion wird von der Atmungskette katalysiert.

Formal handelt es sich dabei um die stark exergone Knallgasreaktion.



Die Energie des Wasserstoffs wird jedoch nicht explosionsartig in einem Schritt freigesetzt, sondern stufenweise in Form von kleinen Energiepaketen. Diese kontrollierte Verbrennung wird durch Zwischenschaltung mehrerer Enzyme mit unterschiedlichen Redoxpotenzialen erreicht.

Die Atmungskette ist also ein energieliefernder Redoxprozess. Koppelt man diesen an die Phosphorylierung von ADP zu ATP dann bezeichnet man den gesamten Prozess als Atmungskettenphosphorylierung.

### 2. Enzyme und Coenzyme der Atmungskette

## NADH+H<sup>+</sup>:

- negativstes Redoxpotenzial  
stammt zum größten Teil aus Citratzyclus, zum Teil aus Pyruvat-Decarboxylierung, aerober Glykolyse, oxidativer Desaminierung von Aminosäuren,  $\beta$ -Oxidation von Fettsäuren
- überträgt H<sup>+</sup> auf Flavoprotein (FMN:Flavinmononucleotid), das von Ubichinon regeneriert wird
- wird es im Zytoplasma gebildet, kann es die Mitochondrienmembran nicht durchdringen ( innere Membran nur für O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O durchlässig)
- H<sup>+</sup> wird dann auf Substrate übertragen, die in reduzierter Form die Mitochondrienmembran passieren können (Malat,  $\beta$ -Hydroxybutyrat, Succinat;..)
- im Mitochondrium läuft dann die Dehydrierung zum mitochondrialem NADH+H<sup>+</sup> ab
  - Malat-Aspartat-Shuttle: Transportweg für zytoplasmatisches NADH+H<sup>+</sup>

## **Flavoproteine:**

- sind alle Enzymproteine mit Flavinnucleotiden als prosthetische Gruppe (fest an ein Enzym gebundenes Coenzym, das das Enzym auch während der Reaktion nicht verlässt)
- können Wasserstoff von NADH+H<sup>+</sup> bzw. NADPH+H<sup>+</sup> oder direkt von Substraten übernehmen: NADH wird von NADH-Dehydrogenase oxidiert, die die Wasserstoffübertragung vom NADH auf das FMN katalysiert; FMN wird zu FMNH<sub>2</sub> reduziert;
- Enzym wirkt als NADH-Ubichinon-Oxidoreduktase: überträgt den Wasserstoff des FMNH<sub>2</sub> unmittelbar auf Ubichinon
- Beispiele: Succinat-Dehydrogenase, Acyl-CoA-Dehydrogenase

## **Ubichinon= Coenzym Q**

- Sammelbecken für Wasserstoff, der von verschiedenen Flavoproteinen geliefert wird
- Lipophil, ist daher in die Lipidphase der Mitochondrienmembran eingelagert und dort frei beweglich
- Vom Ubihydrochinon werden Elektronen an Cytochromoxidase (Komplex III) weitergegeben
- Geht bei der Reduktion in aromatisches Hydrochinon (=Ubichinol) über

NADH+H<sup>+</sup>, Flavoproteine und Ubichinon bilden den Wasserstoffübertragenden Teil.

## **Cytochrome:**

- Hämoproteine
- Durch reversible Oxidation des Häm-Fe<sup>2+</sup> zu Hämin-Fe<sup>3+</sup> können Cytochrome in Redoxketten Elektronen übertragen; pro Cytochrommolekül ein Elektron
- Enthalten als nichtproteinartige Wirkgruppe einen Porphyrinring mit komplex gebundenem Fe<sup>2+</sup> bzw. Fe<sup>3+</sup>

Cytochrom c: - ähnlich wie Ubichinon Hilfssubstrat der Atmungskette

- hat gleiche Porphyrinsysteme wie Hämoglobin, nur unterschiedliche Bindung an Proteinkomponente; alle 6 Koordinationsstellen des Fe-Atoms besetzt
- keine Anlagerung von O<sub>2</sub> oder CO, CN<sup>-</sup> möglich
- schließt an Cytochrom b an

Cytochrom b: - Elektronenakzeptor der auf Ubichinon folgt

- kann nur ein Elektron aufnehmen, vom Ubichinon kommen jedoch 2
- Umschaltung von Zwei-Elektronentransport auf Ein-Elektronentransport
- Von einem reduziertem Ubichinon werden zwei Cytochrom b reduziert

Cytochrom-c-oxidase: - oxidiert reduziertes Cytochrom c

- End-Oxidase mit der der Luftsauerstoff reagiert
  - Besteht aus zwei  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  Porphyrinkomplexen und zwei Cu-Ionen
  - Reduzierte Cytochrom-c-oxidase reduziert  $\frac{1}{2} \text{O}_2$  zu  $\text{O}^{2-}$ ;  $\text{O}^{2-}$  vereinigt sich mit den beiden Wasserstoff, die von Ubichinonoxidation übrig geblieben sind zu Wasser
- $$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

Die Cytochrome bilden den Elektronenübertragenden Teil.

### 3.Redoxpotentiale der Enzyme der Atmungskette

Die am Wasserstoff- und Elektronentransport beteiligten Enzyme und Cosubstrate der Atmungskette sind Redoxsysteme, deren elektrische Potentiale experimentell bestimmt werden können.

Die Messung elektrischer Potentiale erfolgt mit einem Potentiometer, das zwischen 2 Halbzellen geschaltet ist. Die zwischen beiden Halbzellen gemessene Spannung (Volt) ist das Normalpotential  $E_0$ .

Die Reihenfolge der Enzyme der Atmungskette richtet sich nach ihrem Redoxpotential, d.h. nach der Größe ihrer Elektronenaffinität. Der Elektronenfluss durch die Atmungskette erfolgt stets vom Partner mit niedrigerer Elektronenaffinität

→ niedrigeres Redoxpotential zum Partner mit höherer Elektronenaffinität bzw. höherem Redoxpotential

Bei solchen hintereinandergeschalteten (miteinander gekoppelten) Redoxsystemen wird ein Reaktionsteilnehmer jeweils von dem vorgeschalteten reduziert, während er seinerseits den nachgeschalteten Partner reduziert und dabei selbst wieder oxidiert wird.

Das Redoxpotential ist ein Maß für die Triebkraft des Elektronenübergangs.

Die bei den einzelnen Reaktionsschritten freiwerdende Teilbeträge entsprechen dem elektrischen Potential der jeweils reagierenden Partner.

### 4.Enzymkomplexe

Die Enzyme der Atmungskette bilden in der inneren Mitochondrienmembran eine zusammenhängende Enzymstraße und sind z.T. in Komplexen organisiert, die als Komplex I-IV bezeichnet werden.

Die Elektronentransportkette umfasst 3 Proteinkomplexe ( I, III, IV ), die in der inneren Mitochondrienmembran integriert sind und bewegliche Überträgermoleküle ( Ubichinon, Cytochrom c ) enthält. Auch die eigentlich zum Citratzyclus gehörende Succinat-Dehydrogenase ordnet man als Komplex II der Atmungskette zu. Alle Komplexe sind aus zahlreichen Polypeptid-Untereinheiten aufgebaut und enthalten proteingebunden eine Reihe verschiedener Redoxcoenzyme (FMN oder FAD, Eisen-Schwefel-Zentren, Häm-Gruppen).

Komplex I            NADH<sup>2</sup>-Ubichinon-Oxidreduktase

- Katalysiert die Wasserstoffübertragung von NADH+H auf Ubichinon (CoQ)  
 $\text{NADH} + \text{H} + \text{Ubichinon} \rightarrow \text{NAD} + \text{Ubichinol}$   
 Die Oxidation des NADH erfolgt durch ein FMN-abhängiges Flavinenzym (NADH-Dehydrogenase)  $\rightarrow \text{NAD}^+$   
 Dieses katalysiert die Wasserstoffübertragung von NADH auf das FMN und reduziert es dabei zu FMNH<sub>2</sub>. Unmittelbar danach überträgt es den Wasserstoff des FMNH<sub>2</sub> auf Ubichinon. Ubichinon ist ein chiroides System, das im oxidierten und reduzierten Zustand vorliegt.  
 2 Elektronen auf FMN  $\rightarrow$  FMNH<sub>2</sub>  $\rightarrow$  Eisen-Schwefel-Cluster  $\rightarrow$  CoQ (Ubichinon)

## → Ubichinol

- größter Komplex der Atmungskette (23-30 Untereinheiten)
- enthält als prosthetische Gruppe ein Flavinmononucleotid (FMN) und ein Eisen-Schwefel-Protein
- Hemmstoff: Barbiturate, hemmt die Wasserstoffübertragung von FMN auf Ubichinon

### Komplex II Succinat-Ubichinon-Oxidreduktase

- Katalysiert die Wasserstoffübertragung von Succinat auf Ubichinon.  
 $\text{Succinat} + \text{Ubichinon} \rightarrow \text{Fumarat} + \text{Ubichinol}$   
 Dieses aus dem Citratzyclus stammende Substrat wird durch ein FAD-abhängiges Flavoprotein, die Succinat-Dehydrogenase, oxidiert. Die Dehydrierung von Succinat liefert Fumarat. Der Wasserstoff vom Succinat wird über FADH<sub>2</sub> auf das Ubichinon übertragen.
- Der Komplex enthält außer FAD (als Coenzym) ein Eisen-Schwefel-Protein mit der prosthetischen Gruppe (Fe S )

### Komplex III Ubihydrochinon –Cytochrom-c-Reduktase

An den wasserstoffübertragenden Teil der Atmungskette schließt sich der Elektronenübertragende Teil an. Dieser besteht aus verschiedenen Cytochromen (b, c1 ,c) und dem Cytochromoxidase-System (Cytochrom a). Diese Komponenten der Atmungskette enthalten als nicht proteinartige Wirkgruppe einen Porphyrinring mit Komplex gebundenem Fe<sup>2+</sup> und Fe<sup>3+</sup>.

- Katalysiert die Übertragung der Elektronen von Ubichinon auf Cytochrom c.
  - vom reduzierten Ubichinon werden 2 Elektronen in der Atmungskette weitertransportiert
  - es bleiben 2 Protonen zurück, die später der Wasserbildung dienen
  - unmittelbarer Elektronenacceptor nach dem Ubichinon ist das Cytochrom b
  - da vom Ubichinon 2 Elektronen stammen, das Cytochrom b aber nur jeweils ein Elektron aufnehmen und übertragen kann, erfolgt auf dieser Stufe die Umschaltung vom zwei- auf den Einelektrontransport. Von einem reduzierten Ubichinonmolekül werden demzufolge 2 Moleküle Cytochrom b reduziert.
  - an das Cytochrom b schließen sich als Elektronenacceptoren das Cytochrom c1 und dann das Cytochrom c an

- Der Komplex enthält 2 Moleküle Cytochrome b, ein Molekül c1 und ein Molekül Eisen-Schwefel-Protein, sowie 3 oder 4 Moleküle Strukturprotein und 140 Phospholipidmoleküle.
- Hemmstoff: Antimycin A , hemmt die Reaktion: Cytochrom b → Cytochrom c1

#### Komplex IV                      Cytochrom-c-Oxidase

- Katalysiert den Elektronentransport von Cytochrome c auf Sauerstoff  
 $2 \text{ Cytochrom c red} + \frac{1}{2} \text{ O} + 2 \text{ H}^+ \rightarrow 2 \text{ Cytochrome c ox} + \text{ H}_2\text{O}$ .
- die Cytochrom-Oxidase reduziert ein halbes Sauerstoffmolekül zu  $\text{O}^{2-}$ , welches stark basisch ist
- diese vereinigt sich mit den beiden, von der Ubichinonoxidation übriggebliebenen

### **Wasserstoffionen zu Wasser**

- Besteht aus 13 unterschiedlichen Polypeptiduntereinheiten (I-XIII), von denen 3 durch das Genom der Mitochondrien codiert werden .
- Der Komplex enthält die Cytochrome a und a<sup>3</sup>, sowie 2 am Elektronentransport beteiligte Cu-Ionen.
- CO, H<sub>2</sub>S, CN<sup>-</sup>, (HCN=Blausäure), Enzymgifte der Cytochromoxidase

5. Abbildung vom Ablauf

6. Oxidative Phosphorylierung

#### **6a. Aufbau des Protonengradienten:**

- die Komplexe I, III und IV sind Protonenpumpen und bilden den elektrochemischen Protonengradienten zur ATP-Synthese
- Voraussetzung: die innere Mitochondrienmembran ist undurchlässig für frei diffundierende Protonen
- Jeweils 2 H<sup>+</sup> werden aus der Mitochondrienmatrix durch die Innenmembran nach außen gepumpt; durch diesen Elektronentransport entsteht Energie
- Gradientenerhaltung (Rückführung der Protonen von außen nach innen) verursacht Energiefreisetzung
- daher Protonengetriebene ATP-Synthese genannt

#### **6b. ATP-Synthese:**

- um Konzentrationsausgleich der Protonen zu vermeiden ( keine ATP-Herstellung mehr), müssen immer wieder neue Protonen in den Membranzwischenraum gepumpt werden → Energie dafür aus Knallgasreaktion
- erfolgt am integralen Proteinkomplex der inneren Mitochondrienmembran, ATP-Synthase oder Komplex V genannt
- Enzym wirkt als Synthase, wenn ein Protonengradient von außen nach innen besteht (es gibt auch eine ATPase, die ATP spaltet)
- Bei Erhaltung des Protonengradienten, der bei Transport der Protonen von außen nach innen durch den Protonenkanal der ATPase eintritt, entsteht Energie für die ATP-Synthese
- Der Protonengradient treibt auch den Transport von anorganischem Phosphat, Austausch von ATP/ADP mittels ATP/ADP-Transporter (ATP-Translokase) an

## 6c. ATP-Synthase:

Die Protonen diffundieren aus dem Zwischenraum nach innen und passieren dabei den großen Enzymkomplex ATP-Synthase. Dieses Enzym stellt aus ADP und Phosphat das ATP her

- die ATP-Synthase wird als Komplex V bezeichnet, obwohl sie nicht am Elektronentransport teilnimmt
- besteht aus zwei Proteinkomplexen:
- F<sub>0</sub>-Komplex: sitzt in der Mitochondrieninnenmembran und bildet einen Protonenkanal
- F<sub>1</sub>-Komplex: - sitzt dem F<sub>0</sub>-Komplex auf, ragt pilzförmig in die Mitochondrienmatrix hinein und ist aus neun Untereinheiten aufgebaut; Protonen werden durch den Kanal in F<sub>0</sub> transportiert und verursachen in F<sub>1</sub> eine Konformationsänderung, die dort die ATP-Synthase antreibt
- In jeder der drei β-Untereinheiten gibt es ein aktives Zentrum für die Bildung von ATP aus ADP und P

## P/O-Quotient: Verhältnis von gewonnenem zu verbrauchtem Sauerstoff

- durch NAD<sup>+</sup> dehydrierte Substrate entstehen 3 Sauerstoff bzw. ATP
- durch FAD dehydrierte Substrate entstehen 2 Sauerstoffe bzw. ATP

## **Adeninnucleotid-Translokase:**

- katalysiert den Antiport von ATP und ADP
- ermöglicht die Translokation von in den Mitochondrien erzeugtem ATP im cytosolischem Raum, während gleichzeitig im cytosolischem Raum durch energieverbrauchende Prozesse entstandenes ADP in den Matrixraum zurück transportiert wird
- ein Symporter katalysiert den Transport von Phosphat und Protonen, mit denen die Phosphatbilanz der Atmungskette ausgeglichen wird

## 7. Hemmung/ Entkopplung

Aufgrund des Angriffsortes in der Atmungskette unterscheidet man Stoffe,

- die den Elektronentransport unter O<sup>2</sup>-Verbrauch hemmen

→ Hemmer

- von denjenigen, die die ATP-Bildung hemmen, „das O<sup>2</sup>-verbrauchende System“ jedoch

intakt lassen

→ Entkoppler

## Hemmer:

- Atmung und Phosphorylierung werden gleichermaßen gehemmt
- Der P/O-Quotient bleibt gleich
- Oligomycin blockiert den Protonenkanal
- Aurovertin blockiert das aktive Zentrum der ATP-Synthase
- CN<sup>-</sup>, CO; Enzymgifte der Cytochromoxidase
- Alle diese Stoffe (Hemmer) bringen den Elektronentransport zum Erliegen.

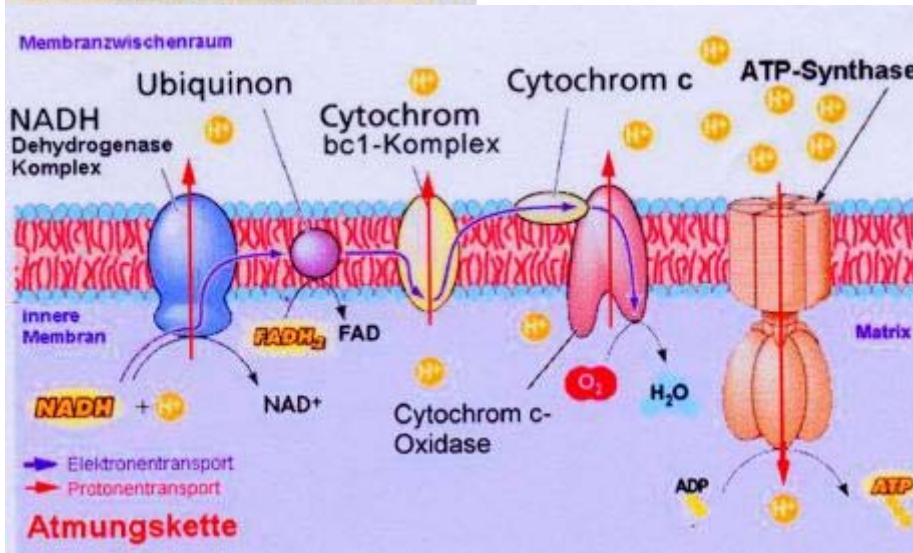
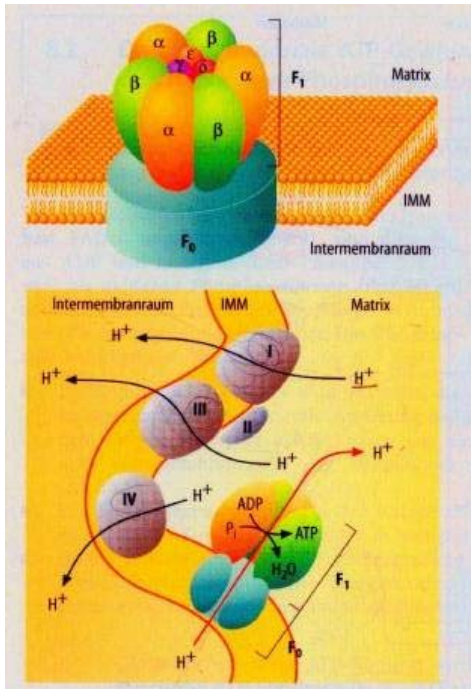
## **Entkoppler:**

Entkoppler der Atmungskette sind Moleküle, die in der inneren Mitochondrienmembran für Protonen durchgängige Kanäle bilden und so einen ständigen „Kurzschluss“ des Protonentransportes unter Umgehung der ATP-Synthase verursachen.

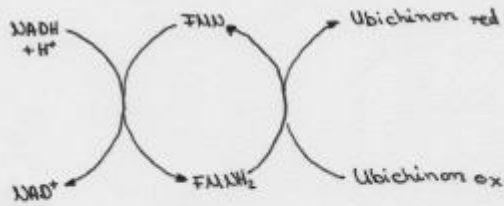
Unter Wirkung von Entkopplern läuft die Atmungskette im „Leerlauf“. Sie ist entkoppelt!

- koppeln den Elektronentransport von der Atmungskettenphosphorylierung ab. z.B. 2,4-Dinitrophenol (Sprenstoff, Insektizid, Herbizid), Valinomycin
- 2,4-Dinitrophenol ist eine schwache Säure, die wegen saurem Außenraum der Mitochondrien undissoziiert vorliegt und als solche in den Mitochondrieninnenraum diffundiert
- wegen höherem pH im Innenraum dissoziiert sie und wandert als Anion wieder zurück in den Außenraum
- dadurch wird der Protonengradient zerstört, es findet keine ATP-Synthese statt und die gesamte Energie der NADH-Oxidation geht in Wärme über
- Der Elektronentransport geht jedoch normal weiter und kann sich sogar steigern, weil ATP-Synthese als geschwindigkeitsbestimmende Reaktion wegfällt
- Toxische Wirkung: hochgradige Abmagerung, Steigerung des Sauerstoffverbrauches, stark gesteigerter Stoffwechsel, erhöhte Wärmeproduktion (Hyperpyrexie)
- Tiere die Winterschlaf halten, können zur Wärmeproduktion die Atmungskette physiologisch entkoppeln mit dem Membranprotein Thermogenin
- Der P/O-Quotient sinkt unter 3.

Anhang:



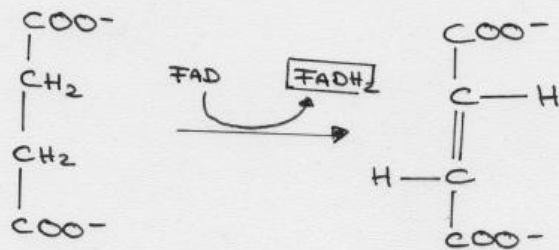
KOMPLEX I  $\Rightarrow$  NADH<sub>2</sub> - Ubichinon - Oxidoreduktase



Bei der Oxidation von NADH durch Komplex I gelangen Elektronen über FMN und Eisen-Schwefel-Zentren zum Ubichinon!

Quelle: Mediz. Biochemie 2. Auflage

Komplex II



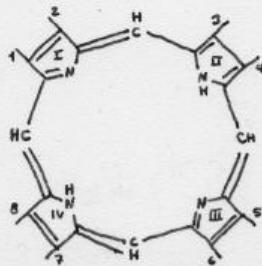
Succinat

Fumarat

Succinat - Ubichinon - Oxidoreduktase

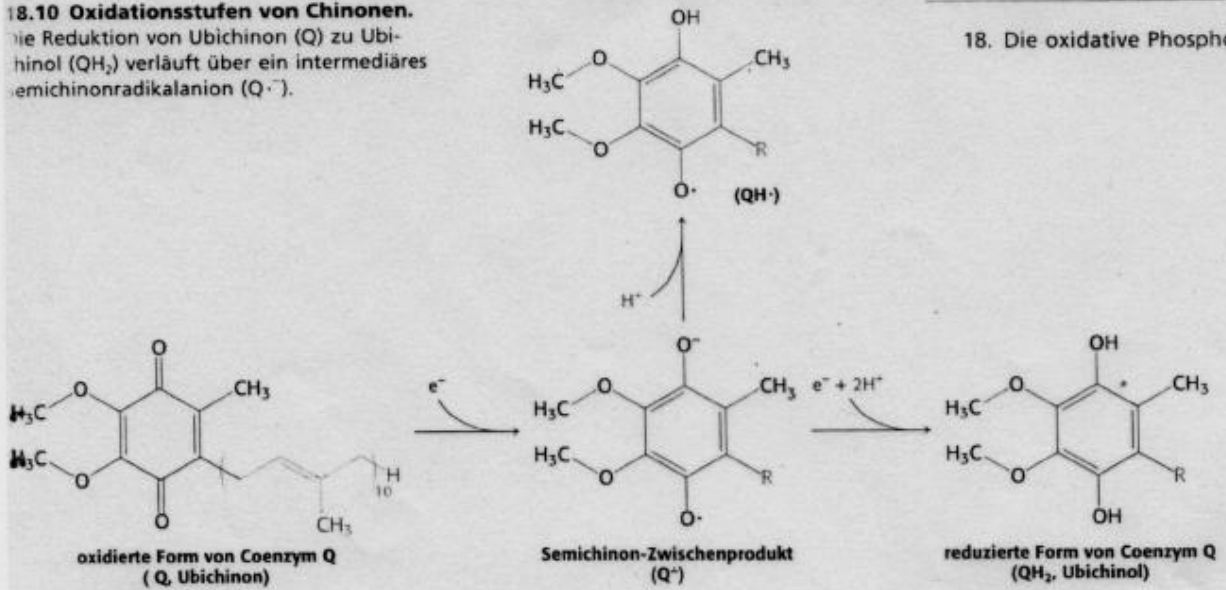
Quelle: Stryer, 4. Auflage

PORPHYRINRING

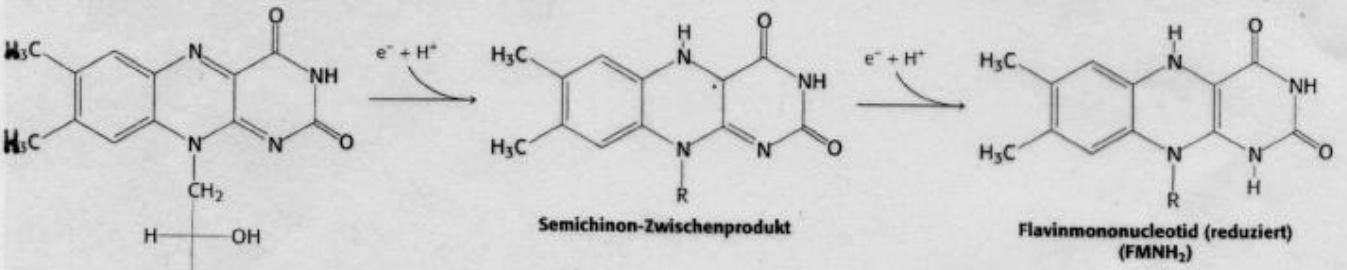


**18.10 Oxidationsstufen von Chinonen.**

Die Reduktion von Ubichinon (Q) zu Ubichinol (QH<sub>2</sub>) verläuft über ein intermediäres semichinonradikalanion (Q<sup>•-</sup>).



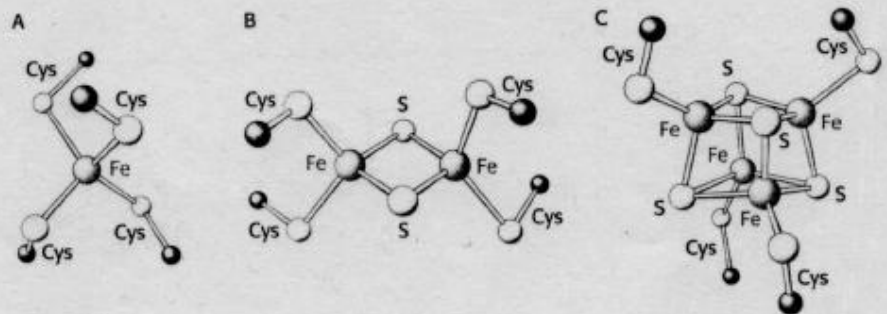
**18. Die oxidative Phosphorylierung**

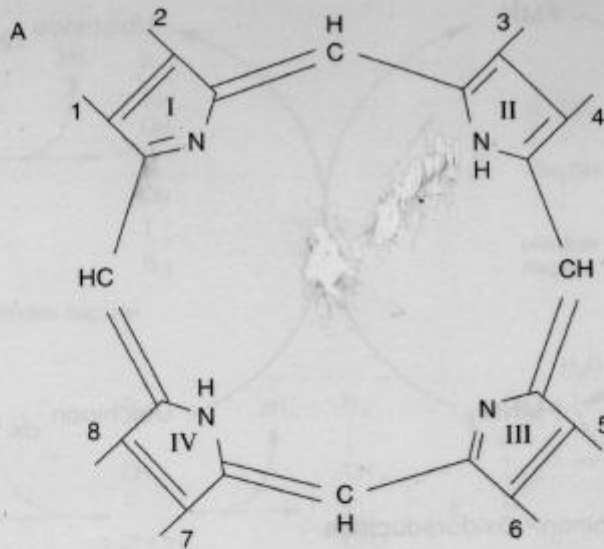


**18.12 Oxidationsstufen von Flavinen.**  
 Die Reduktion von Flavinmononucleotid (FMN) zu FMNH<sub>2</sub> verläuft über ein Semichinon-Zwischenprodukt.

**II. Übertragung und Speicherung von Energie**

**18.13 Eisen-Schwefel-Cluster.** A) Vier Cysteinreste binden ein einziges Eisenion. B) 2Fe-2S-Cluster mit einer Brücke aus Sulfidionen zwischen den Eisenionen. C) 4Fe-4S-Cluster. Jeder Cluster kann oxidiert und reduziert werden.





B Seitenketten der Porphyrine verschiedener Cytochrome

Porphyrine einzelner Cytochrome	1	2	3	4	5	6	7	8
Cytochrom b (Protoporphyrin IX)	-CH <sub>3</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	-CH <sub>3</sub>
Cytochrome c (substituiertes Protoporphyrin IX, 2 kovalente Thioätherbindungen mit Cys-14 und Cys-17 des Proteins, R)	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c} \text{R} \\   \\ \text{S} \\   \\ \text{CH} - \text{CH}_3 \\   \end{array}$	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c} \text{R} \\   \\ \text{S} \\   \\ \text{CH} - \text{CH}_3 \\   \end{array}$	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	-CH <sub>3</sub>
Cytochrom a (Häm A)	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c}   \\ \text{CHOH} \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{hydrophobe Seitenkette} \\ \text{mit 15 C-Atomen} \\ \text{(bestehend aus} \\ \text{3 Isoprenresten)} \end{array}$	-CH <sub>3</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH <sub>3</sub>	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c}   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C} \\   \\ \text{H} \end{array}$

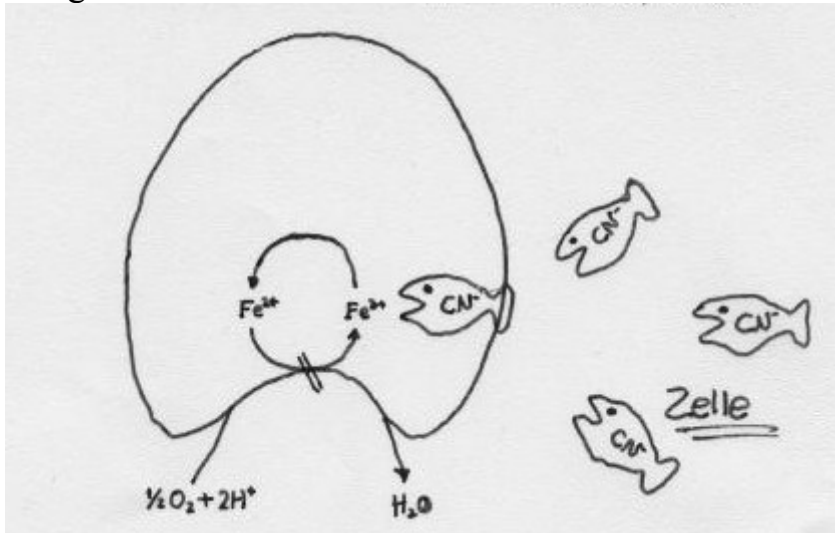
Abb. 15.6:

Prosthetische Gruppen der Cytochrome: Protoporphyrin IX und Häm A.  
 A: Struktur des Porphyrins.  
 B: Seitenketten in den Porphyrinen von Cytochrom b, c und im Häm A.

## Prinzip der „inneren Erstickung“

Cytochromoxidase (Atmungskette)

CN<sup>-</sup> hemmt die Zellatmung, in dem es sich an das Fe<sup>3+</sup> des Atmungsenzym anlagert



## Therapie

Große Mengen Fe<sup>3+</sup>- Verbindungen zur Verfügung stellen um Cyanidionen (bevor sie die Zelle erreichen) abzufangen.

4- DMAP (4-Dimethylaminophenol), welches nach Oxidation Hämoglobin in Methämoglobin umwandelt: Fe<sup>2+</sup> → Fe<sup>3+</sup>

