

## Kapitel 7

### Energie und Elektronen aus Glucose

- Stoffwechselwege finden in kleinen Schritten statt, jeder Schritt wird von einem spezifischen Enzym katalysiert. Die Stoffwechselwege sind häufig kompartimentiert.
- Wenn Glucose verbrennt, wird Energie in Form von Wärme und Licht freigesetzt. Dies trifft im Prinzip auch auf den Abbau der Glucose in der Zelle zu, doch die Reaktion läuft in vielen Einzelschritten ab, sodass die Energie in Form von ATP eingefangen und gespeichert werden kann.

[Siehe Abbildung 7.1](#)

- Oxidation ist die Abgabe von Elektronen; Reduktion ist die Aufnahme von Elektronen. Bei der Oxidation einer Substanz werden die abgegebenen Elektronen auf einen anderen Stoff übertragen, der dadurch reduziert wird. Solche Redoxreaktionen übertragen große Beträge an Energie.

[Siehe Abbildung 7.2](#)

- Das Coenzym NAD ist ein wichtiger Elektronencarrier in biologischen Redoxreaktionen. Es liegt in zwei Formen vor, oxidiert ( $\text{NAD}^+$ ) und reduziert ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ ).

[Siehe Abbildung 7.3](#) und [Abbildung 7.4](#)

- Die Glykolyse arbeitet in Anwesenheit oder Abwesenheit von  $\text{O}_2$ . Unter aeroben Bedingungen wird der Glucoseabbau durch die Zellatmung fortgesetzt. Unter anaeroben Bedingungen findet Gärung statt.

[Siehe Abbildung 7.5](#) und [Aktivität 7.1](#)

- Die Zellatmung setzt sich aus drei Stoffwechselwegen zusammen: Pyruvatoxidation, Citratzyklus und Atmungskette.
- Pyruvatoxidation und Citratzyklus bilden  $\text{CO}_2$  und Wasserstoffatome, die von  $\text{NADH}$  und  $\text{FADH}_2$  übertragen werden. In der Atmungskette werden diese Wasserstoffatome mit  $\text{O}_2$  verknüpft, dabei werden erhebliche Energiemengen für die ATP-Synthese freigesetzt.

[Siehe Abbildung 7.5](#)

- Bei Eukaryoten finden Glykolyse und Gärung im Cytosol außerhalb der Mitochondrien statt; Pyruvatoxidation, Citratzyklus und Atmungskette erfolgen in den Mitochondrien. Bei Prokaryoten finden Glykolyse, Gärung und der Citratzyklus im Cytoplasma statt; Pyruvatoxidation und Atmungskette arbeiten in Assoziation mit der Plasmamembran.

[Siehe Aktivität 7.2](#) und **Tabelle 7.1**

### Die Glykolyse: Von der Glucose zum Pyruvat

- Die Glykolyse ist ein Stoffwechselweg, der aus zehn enzymkatalysierten, im Cytosol lokalisierten Reaktionen besteht. Die Glykolyse liefert die Ausgangsverbindungen für Zellatmung und Gärung.

[Siehe Abbildung 7.6](#)

- Die Reaktionen der Energieinvestitionsphase der Glykolyse verbrauchen zwei Moleküle ATP pro Glucosemolekül und liefern am Ende zwei Moleküle G3P. In den Reaktionen der Energiegewinnungsphase werden zwei Moleküle  $\text{NADH}$  gebildet, ferner vier Moleküle ATP durch Substratkettenphosphorylierung. Pro Glucosemolekül werden zwei Moleküle Pyruvat gebildet.

[Siehe Abbildung 7.6](#) und [Abbildung 7.7](#)

## Die Pyruvatoxidation

- Der Pyruvatdehydrogenase-Komplex katalysiert drei Reaktionen: (1) Pyruvat wird unter Freisetzung von  $\text{CO}_2$  und einer beträchtlichen Energiemenge zu einer Acetylgruppe oxidiert. (2) Ein Teil dieser Energie wird genutzt, indem  $\text{NAD}^+$  zu  $\text{NADH} + \text{H}^+$  reduziert wird. (3) Die verbleibende Energie wird eingefangen, wenn die Acetylgruppe mit Coenzym A verknüpft wird; es entsteht Acetyl-CoA.

## Der Citratzyklus

- Die in Acetyl-CoA enthaltene Energie treibt die Reaktion von Acetat mit Oxalacetat zu Citrat an. Der Citratzyklus besteht aus einer Reihe von Reaktionen, in denen Citrat oxidiert und Oxalacetat regeneriert wird (daher „Zyklus“). Für jedes Acetyl-CoA werden 2  $\text{CO}_2$ , 1  $\text{FADH}_2$ , 3  $\text{NADH}$  und 1 ATP gebildet.

[Siehe Abbildung 7.8](#), [Abbildung 7.9](#) und [Aktivität 7.3](#)

## Die Atmungskette: Elektronen, Protonen und ATP-Synthese

- $\text{NADH}$  und  $\text{FADH}_2$ , die aus der Glykolyse, der Pyruvatoxidation und dem Citratzyklus stammen, werden in der Atmungskette oxidiert, sodass  $\text{NAD}^+$  und  $\text{FAD}$  regeneriert werden. Die meisten Enzyme und andere Elektronentransporter der Kette sind Teil der inneren Mitochondrienmembran. Aus molekularem Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ), dem endgültigen Elektronen- und Protonenakzeptor, wird Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

[Siehe Abbildung 7.10](#), [Abbildung 7.11](#) und [Aktivität 7.4](#)

- Der Protonentransport ist durch Chemiosmose an die oxidative Phosphorylierung gekoppelt. Während sich die Elektronen entlang der Atmungskette bewegen, werden Protonen aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gepumpt; dadurch entsteht ein Gradient in der Protonenkonzentration und der elektrischen Ladung – die protonenmotorische Kraft.

[Siehe Abbildung 7.12](#) und [Tutorium 7.1](#)

- Getrieben durch die protonenmotorische Kraft diffundieren Protonen durch das membrangebundene Kanalprotein ATP-Synthase zurück in die Mitochondrienmatrix; die ATP-Synthase nutzt den Protonenfluss zur ATP-Synthese. Dieser Mechanismus der ATP-Synthese, die Chemiosmose, wurde durch mehrere Schlüsselexperimente nachgewiesen.

[Siehe Abbildung 7.13](#) und [Tutorium 7.2](#)

## Gärung: ATP aus Glucose, in Abwesenheit von Sauerstoff

- Viele Einzeller und bestimmte eukaryotische Körperzellen können zumindest zeitweise ohne  $\text{O}_2$  leben und gewinnen dann ihre gesamte Energie aus der Kombination von Glykolyse und Gärung. Glucose wird in diesen Stoffwechselwegen nur teilweise oxidiert, es entstehen energiereiche Produkte wie Milchsäure oder Ethanol.

[Siehe Abbildung 7.14](#) und [Abbildung 7.15](#)

## Gegenüberstellung der Energieausbeute

- In der Gärung werden pro abgebautem Glucosemolekül 2 Moleküle ATP gebildet. Andererseits liefert die Glykolyse gemeinsam mit anschließender Pyruvatoxidation, Citratzyklus und Atmungskette bis zu 38 Moleküle ATP pro Glucosemolekül.

[Siehe Abbildung 7.16](#) und [Aktivität 7.5](#)

## Beziehungen zwischen Stoffwechselwegen

- Katabolische Stoffwechselwege versorgen die Energie gewinnenden Stoffwechselwege. Polysaccharide werden zu Glucose gespalten, diese geht in die Glykolyse ein. Auch Glycerol (Glycerin) aus Fetten gelangt in die Glykolyse; Acetyl-CoA aus dem Fettsäureabbau tritt in den Citratzyklus ein. Proteine und Nucleinsäuren gelangen über ihre Bausteine in die Glykolyse und den Citratzyklus.  
[Siehe Abbildung 7.17](#) und [Abbildung 7.18](#)
- Anabolische Stoffwechselwege nutzen Zwischenprodukte der Energie gewinnenden Stoffwechselwege, um Fette, Aminosäuren oder andere essenzielle Bausteine zu synthetisieren.  
[Siehe Abbildung 7.17](#) und [Abbildung 7.18](#)

## Die Regulation der Energie gewinnenden Stoffwechselwege

- Durch die Einwirkung von ATP, ADP,  $\text{NAD}^+$  oder  $\text{NADH} + \text{H}^+$  auf allosterische Enzyme wird die Rate von Glykolyse und Citratzyklus gesteigert oder vermindert.
- Ein Überfluss an ATP aus der Zellatmung verlangsamt die Glykolyse, indem das Glykolyse-Enzym Phosphofruktokinase durch ATP gehemmt wird. ADP aktiviert dieses Enzym und beschleunigt dadurch die Glykolyse. Die Isocitratdehydrogenase, ein Enzym des Citratzyklus, wird durch ATP und NADH gehemmt sowie durch ADP und  $\text{NAD}^+$  aktiviert.  
[Siehe Abbildungen 7.19, Abbildung 7.20](#) und [Aktivität 7.6](#)