

## Energie aus Nährstoffen – Zellatmung und Gärung

Für alle Lebensprozesse wie Bewegung oder für die Synthese körpereigener Stoffe benötigt ein Organismus Energie. Eine Grundvoraussetzung dafür ist dessen ständige Versorgung mit energiereichen Stoffen. Viele Lebewesen nehmen solche Stoffe mit der Nahrung auf. Durch die Zellatmung setzen sie die darin gespeicherte Energie mithilfe von Sauerstoff wieder frei. Sie wird vor allem bei der Oxidation von Glucose gewonnen.

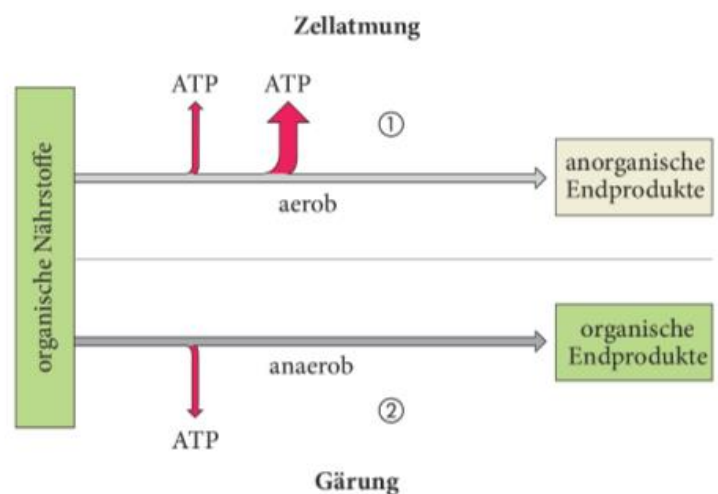
### 1.1 Energiebereitstellung in Zellen

Marathonläufer und Sprinter sind beides Hochleistungssportler, deren Muskelzellen während des Wettkampfs eine enorme Arbeit verrichten müssen (Abb. 124.1). Eine arbeitende Muskelzelle wandelt pro Sekunde 10 Millionen Moleküle ADP in ATP um. Um dies gewährleisten zu können, nutzt sie die chemische Energie, die in der aufgenommenen Nahrung steckt. Der Abbau dieser organischen Stoffe in den Zellen liefert Energie und wird als **Dissimilation** bezeichnet. Die Freisetzung der Energie erfolgt hier schrittweise in **Redoxprozessen**. Die unterschiedliche Beanspruchung der Muskelzellen beider Sportler führt dabei aber zu unterschiedlichen Stoffwechselwegen.

Zum vollständigen enzymatischen Abbau von organischen Nährstoffen zu Wasser und Kohlenstoffdioxid ist Sauerstoff notwendig. Dieser Vorgang wird als **Zellatmung** bezeichnet und verläuft **aerob** ① (Abb. 124.2). Ist nicht genügend Sauerstoff vorhanden, läuft eine zweite Form der Dissimilation ab. Dabei werden die organischen Nährstoffe nur unvollständig abgebaut, sodass organische Endprodukte entstehen. Dieser Vorgang wird als **Gärung** ② bezeichnet. Gärungen benötigen keinen Sauerstoff, sie verlaufen **anaerob**. Aufgrund des unvollständigen Abbaus fällt bei der Gärung weitaus weniger ATP an als bei der Zellatmung. Ein Marathonläufer gewinnt die Energie zu 99 Prozent aerob aus der Zellatmung, ein 200 Meter Sprinter hingegen vorwiegend anaerob durch Gärung.



124.1 Energiebereitstellung. A Marathonläufer; B Sprinter



124.2 Zellatmung und Gärung im Vergleich

- 1 Ermitteln Sie die Wortgleichung für die Zellatmung sowie die Gärung.
- 2 Diskutieren Sie die Vorteile der unterschiedlichen Formen der Dissimilation.

## 1.2 Nahrungsverarbeitung

Der Hauptbestandteil des organischen Materials in der Nahrung besteht aus Proteinen, Nukleinsäuren und Fetten sowie aus Kohlenhydraten in Form von Stärke und anderen Polysacchariden. Sie sind wasserunlöslich und zu groß, um über die Plasmamembranen der Epithelzellen der Dünndarmschleimhaut ins Blut zu gelangen. In dieser Form sind sie somit nicht verwertbar. Daher müssen sie im Verdauungstrakt verarbeitet werden. Diese Verarbeitung lässt sich in vier Stadien einteilen: Nahrungsaufnahme, Verdauung, Resorption und Ausscheidung.

Die **Nahrungsaufnahme** geht in der Regel mit der Einspeichelung und einem Kauvorgang einher. Dabei wird die Nahrung mechanisch zerkleinert, sodass für die enzymatischen Prozesse der Verdauung eine größere Oberfläche zur Verfügung steht.

Die **Verdauung** findet in spezialisierten Kompartimenten des Verdauungstraktes statt (Abb.125.1). Bereits im Mund beginnt der Abbau der Kohlenhydrate durch das Enzym Amylase ①. Der Proteinabbau beginnt im Magen ②, der Lipid- und Nukleinsäureabbau erst im Dünndarm ③. Am Ende des Dünndarms ist der enzymatische Aufschluss der Nährstoffe überwiegend abgeschlossen.

Durch die Verdauung werden die in der Nahrung enthaltenen Makromoleküle in kleine und zumeist wasserlösliche Bausteine zerlegt, die klein genug sind, um vom Darm resorbiert (lat. *resorbere*, aufsaugen) werden zu können. Erst dadurch werden die Nähr-

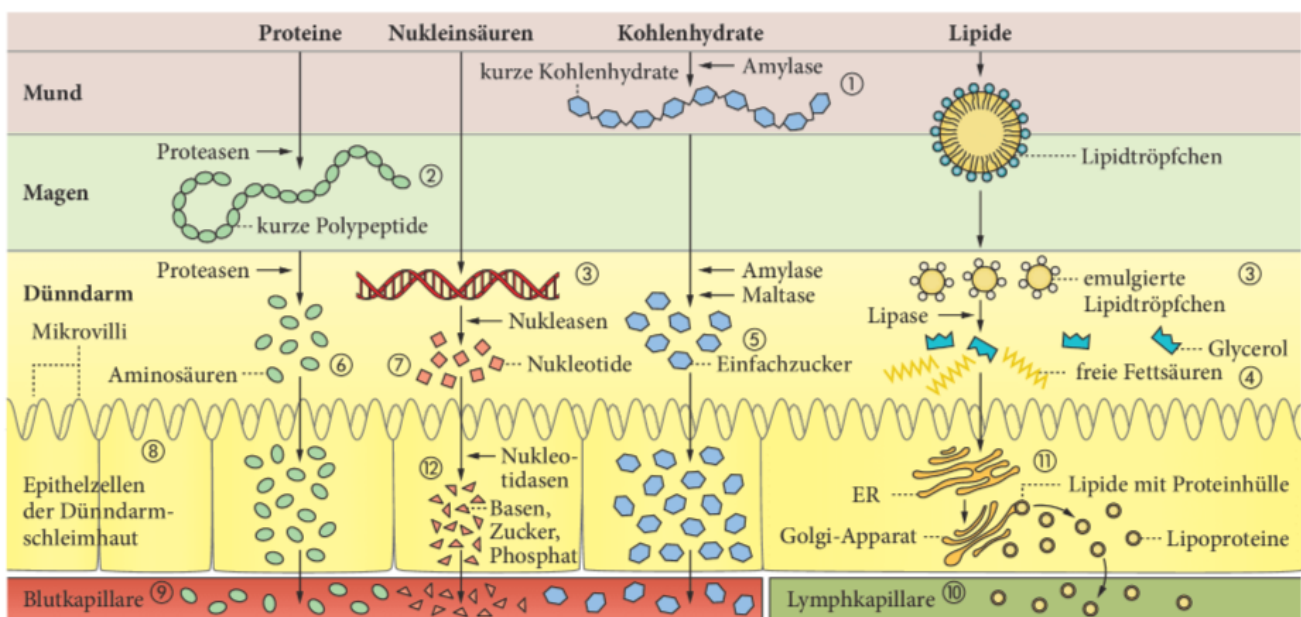
stoffe für die Zellen verwertbar und können etwa zur Biosynthese körpereigener Makromoleküle oder als Energielieferanten in der Dissimilation genutzt werden.

Durch Reaktion mit Wasser, Hydrolyse genannt, spalten Verdauungsenzyme die Bindungen zwischen den Monomeren der Nährstoffe. Sie gehören daher zu den **Hydrolasen**: Lipide werden in Glycerol und Fettsäuren gespalten ④, aus Kohlenhydraten entstehen Einfachzucker ⑤, Proteine werden in Aminosäuren ⑥ zerlegt und Nukleinsäuren zu Nukleotiden abgebaut ⑦. Die Verdauung dreht damit den Vorgang der Bildung von Makromolekülen aus den Monomeren durch Kondensation um (→ S. 60).

Im dritten Schritt der Nahrungsverarbeitung, der **Resorption**, passieren die Monomere die Dünndarm-Epithelzellen ⑧ und gelangen ins Blut ⑨ oder in die Lymphe ⑩. In den Epithelzellen werden dabei bereits körpereigene Lipoproteine aufgebaut ⑪ und Nukleotide durch Nukleotidasen weiter in die Basen, Zucker und Phosphate zerlegt ⑫.

Schließlich erfolgt die **Ausscheidung** von unverdaulichem Material aus dem Verdauungstrakt.

- 1 Beschreiben Sie die Abbildung 125.1.
- 2 Ermitteln Sie die Reaktionsgleichungen für die enzymatische Hydrolyse eines Dipeptids, eines Disaccharids und eines Fettmoleküls.

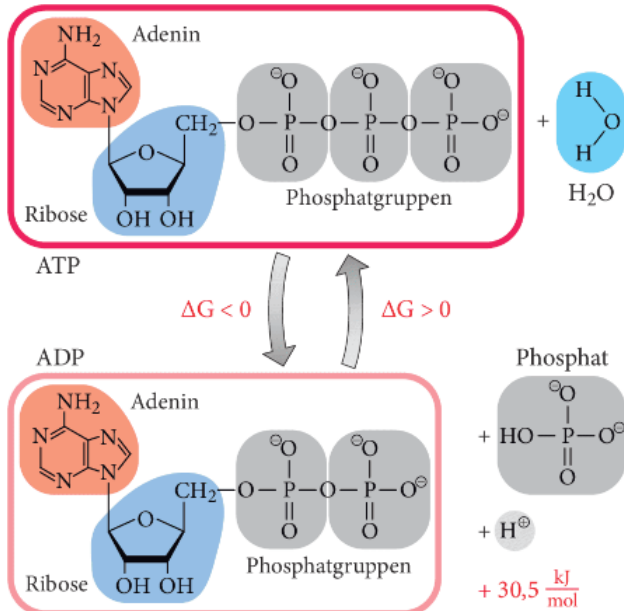


125.1 Enzymatische Hydrolyse und Resorption



# Wichtige Moleküle der Energiebereitstellung in den Zellen

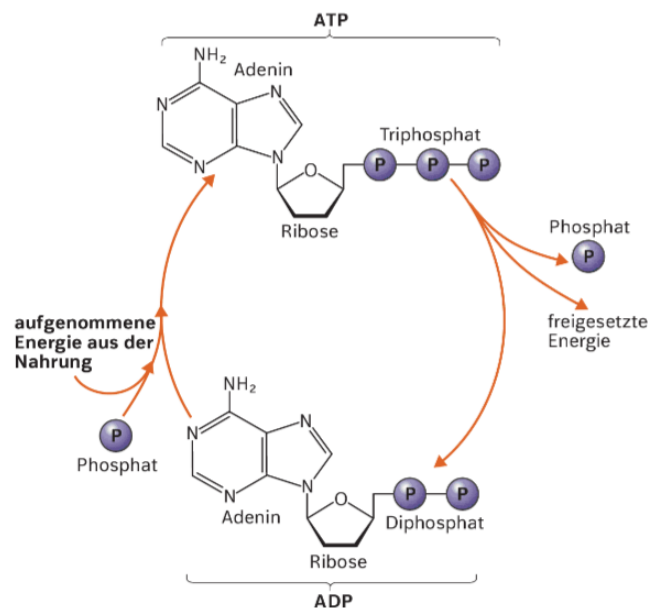
## 1. ATP



102.1 Hydrolyse von ATP und Phosphorylierung von ADP

Ein neu gebildetes ATP-Molekül wird in einer Zelle durchschnittlich innerhalb einer Minute hydrolysiert. In Ruhe benötigt ein Mensch in 24 Stunden rund 70 Kilogramm ATP. Die ATP-Vorräte des menschlichen Körpers sind daher schnell verbraucht, da nur etwa 250 Gramm ATP im Körper vorhanden sind. Deshalb muss im Stoffwechsel ständig wieder ATP aus ADP und  $\text{P}$  regeneriert werden

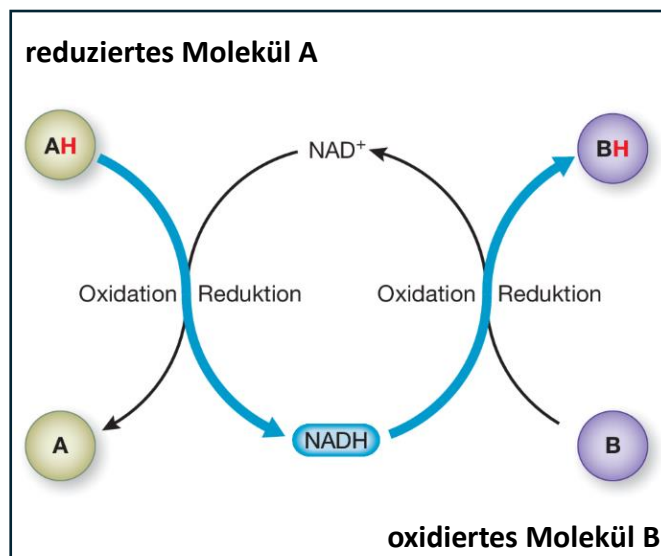
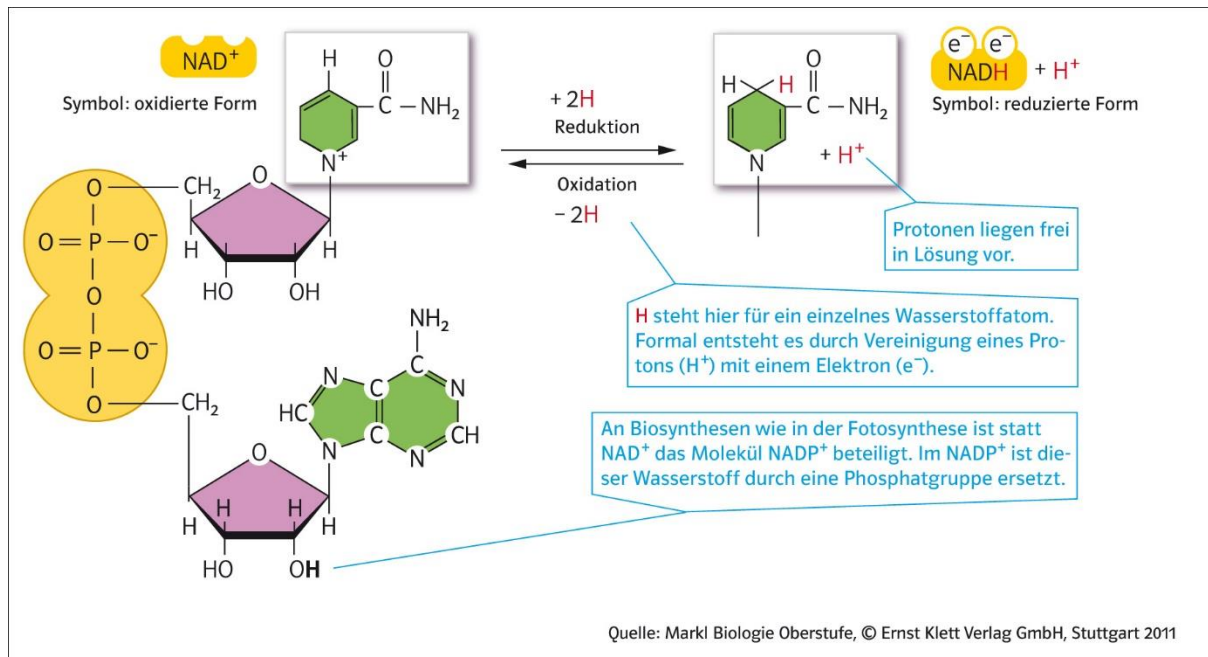
ATP ist der wichtigste Energiespeicher der Zellen. Es besteht aus der Base Adenin, an die ein Molekül Ribose gebunden ist. An die Ribose wiederum sind drei Phosphatgruppen gebunden. Die im Zuge der Zellatmung gebundene dritte Phosphatgruppe kann vom ATP abgespalten werden, wodurch wieder ADP entsteht. Bei dieser exothermen Reaktion wird Energie freigesetzt, die wiederum andere Reaktionen des Stoffwechsels möglich macht.



Die hydrolytische Spaltung von ATP zu ADP und P verrichtet noch keine Arbeit in der Zelle. Die dabei freigesetzte Energie muss daher durch zelluläre Proteine genutzt werden. Häufig wird zu diesem Zweck die endständige Phosphatgruppe von ATP auf andere Moleküle übertragen, sodass diese energiereicher und damit reaktionsfreudiger werden. Man spricht von einer **Phosphorylierung** von Molekülen.

## 2. NAD<sup>+</sup>

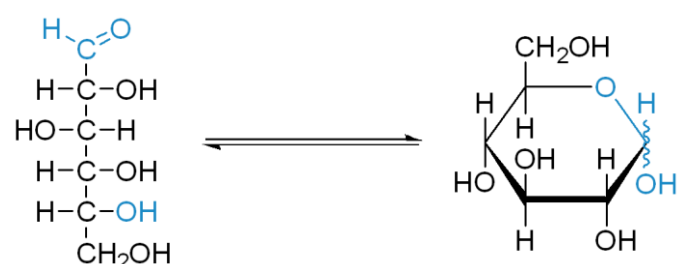
Ein wichtiger Wasserstoffüberträger ist das Molekül *Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid*, kurz NAD<sup>+</sup> genannt. Es wird von zwei Wasserstoffatomen zu NADH + H<sup>+</sup> reduziert. Dabei wird eines der H-Atome mit seinem Elektron fest an NAD<sup>+</sup> gebunden. Das andere H-Atom gibt sein Elektron an das positiv geladene Stickstoffatom des NAD<sup>+</sup> ab. Das Proton (H<sup>+</sup>) wird ebenfalls abgegeben. Die reduzierte Form NADH+H<sup>+</sup> ist ein Zwischenträger, in dem ein Großteil der Energie gespeichert wird.



**Woher kommen die Wasserstoffatome (und die Elektronen), die auf NAD<sup>+</sup> übertragen werden?**

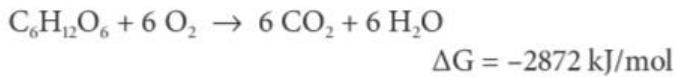
Sie stammen aus den energiereichen (stark reduzierten) Molekülen, wie Zucker (Glucose), Fette und Proteine, die mit der Nahrung aufgenommen werden. Wie die Formel zeigt, stecken in einem Molekül Glucose 12 Wasserstoffatome:

**Strukturformel der Glucose - C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>**



# Zellatmung im Überblick

Der wichtigste Ausgangsstoff der Zellatmung ist die energiereiche Glucose. Die Energie dieses Zuckers wird bei seiner schrittweisen Oxidation mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser freigesetzt. Die Bilanz dieses Abbaus kann durch folgende Reaktionsgleichung wiedergegeben werden:

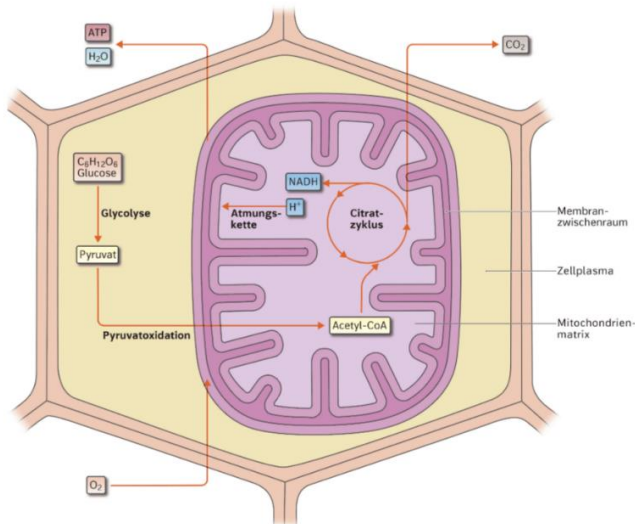


Etwa zwei Drittel der freigesetzten Energie werden in Wärme umgewandelt und tragen bei Tieren zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur bei. Der Rest wird in chemischer Energie in Form von ATP gespeichert und wird so bei fast allen Reaktionen im Körper eingesetzt.

Ganz entscheidend ist, dass der Abbau von Glucose schrittweise erfolgt!

Wenn Sauerstoff in der Zelle in ausreichender Menge vorhanden ist, erfolgt der Abbau von Glucose in folgenden Schritten:

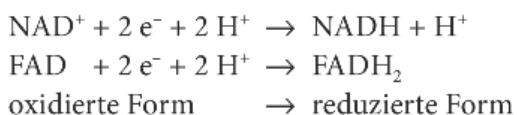
1. Glycolyse
2. Pyruvatoxidation (oxidative Decarboxylierung)
3. Citratzyklus
4. Endoxidation (Oxidative Phosphorylierung, Atmungskette)



Diese Teilprozesse laufen in unterschiedlichen Kompartimenten (Reaktionsräumen) der Zelle ab:

- Glycolyse im **Cytoplasma**
- Pyruvatoxidation in der **Mitochondrienmatrix**
- Citratzyklus in der **Mitochondrienmatrix**
- Endoxidation in der inneren **Mitochondrienmembran**

Glykolyse und Citratzyklus dienen dem eigentlichen Substratabbau. Das Kohlenstoffgerüst der Glucose wird dabei vollständig zu Kohlenstoffdioxid abgebaut. Dabei werden formal Wasserstoffatome, die aus einem Proton und einem Elektron bestehen, aus dem Zucker abgespalten. Dies entspricht einem Elektronenentzug und damit einem oxidativen Abbau des Zuckers. Die Wasserstoffatome werden auf die Coenzyme  $\text{NAD}^+$  und  $\text{FAD}$  übertragen. Diese werden dabei durch die damit verbundene Elektronenaufnahme zu  $\text{NADH} + \text{H}^+$  und  $\text{FADH}_2$  reduziert:



An den Substratabbau schließt sich die Endoxidation an. Sie dient der Oxidation der zuvor reduzierten Coenzyme. Ohne die Endoxidation würde die komplette Zellatmung schnell zum Erliegen kommen. Die oxidierten Coenzyme würden als Elektronenakzeptoren in der Glykolyse und im Citratzyklus fehlen. Die in der Endoxidation freiwerdenden Elektronen und Protonen werden auf Sauerstoffmoleküle übertragen. Sauerstoff wird dadurch reduziert und es entsteht

$$\begin{aligned} \text{NADH} + \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 &\rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O} \\ \text{FADH}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 &\rightarrow \text{FAD} + \text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Die freiwerdende Energie wird zur ATP-Bildung genutzt. Diese Art der ATP-Bildung wird **oxidative Phosphorylierung** genannt. Sie liefert den größten Teil des bei der Zellatmung entstehenden ATPs.