

Zuckerverbrennung und Zellatmung im menschlichen Körper

Zellen benötigen Energie, um Stoffwechsel zu betreiben. Diese Energie erhalten sie durch die „Verbrennung“ von Nährstoffen, die wir mit der Nahrung aufnehmen. Die wichtigsten Nährstoffe sind Kohlenhydrate, Fette und Proteine. Die verschiedenen Nährstoffe haben unterschiedliche Aufgaben im Körper. Kohlenhydrate z. B., dienen hauptsächlich als Energielieferanten, um die Arbeit der Muskeln, die Tätigkeit aller Körperorgane und die Körperwärme aufrecht zu erhalten. Kohlenhydrate können aus Einfach-, Zweifach- oder Mehrfachzuckern (Mono-, Di- oder Polysacchariden) bestehen. Die beiden letzteren werden während des Verdauungsprozesses mithilfe verschiedener Enzyme in Einfachzucker (z. B. Glukose) zerlegt. Vom Darm diffundiert die Glukose in das Blut. Von dort wird sie zu den Zellen des Verbrauchs (z. B. Muskelzellen) transportiert und in den Prozessen der sog. Zellatmung (Glykolyse, Zitronensäurezyklus, Atmungskette) zu Wasser und Kohlenstoffdioxid oxidiert. Diese Oxidationsvorgänge liefern ATP (Adenosintriphosphat) als chemischen und universell im Stoffwechsel verwendbaren Energiespeicher.

Die drei Teilprozesse der Zellatmung laufen in verschiedenen Bereichen der Zelle ab. Die **Glykolyse** findet im Zytoplasma der Zelle, **Citratzyklus** und **Atmungskette** finden im Mitochondrium statt. Der größte Teil der Energie entsteht in der Atmungskette. Deshalb werden die Mitochondrien oft auch die „Kraftwerke“ der Zelle genannt. Je höher die Anzahl der Mitochondrien in einer Zelle, desto höher ist ihr Energiebedarf. Viele dieser „Kraftwerke“ befinden sich beispielsweise in den Herzmuskelzellen oder in den Gehirnzellen.

Die drei Prozesse der Zellatmung

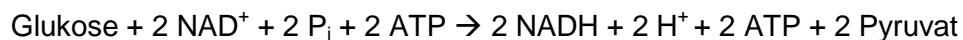
Glykolyse

In der Glykolyse wird das Kohlenstoffgerüst eines Glukosemoleküls mit sechs Kohlenstoffatomen zu zwei Molekülen mit drei Kohlenstoffatomen umgebaut, die entstehende Verbindung heißt Pyruvat (auch Brenztraubensäure).

Der Abbau von Glukose läuft in neun Schritten ab:

- Im ersten Reaktionsschritt wird eine Phosphatgruppe (P_i) an das Glukosemolekül angehängt. Dieser Prozess heißt **Phosphorylierung**. Es entsteht Glukose-6-phosphat, welches energiereicher und für die Zellwand nicht mehr passierbar ist.
- Im zweiten und dritten Schritt folgt die Umwandlung in Fruktose-6-phosphat. Dieses wird in 2 Prozessen unter Verwendung von Energie (ATP) in zwei Triosephosphate gespalten.
- In den Schritten vier bis neun folgen weitere Umwandlungsprozesse, bei denen chemische Energie in Form von ATP und NADH (Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid) entsteht. NADH wird später in der Atmungskette zur Synthese von ATP benötigt.
- Das Endprodukt der Glykolyse, das Pyruvat, wird für die weitere Energiegewinnung in die Mitochondrien transportiert.

Die Bruttogleichung der Glykolyse lautet also:



Zitronensäurezyklus (Citratzyklus)

Vorbereitung auf den Citratzyklus

In Vorbereitung auf den Citratzyklus wird das Kohlenstoffgerüst des Pyruvats von drei auf zwei Kohlenstoffatome verkürzt und an das Coenzym A gebunden. Dabei wird Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff freigesetzt. Der Wasserstoff wird auf das Coenzym NAD^+ übertragen, dabei entsteht $\text{NADH}+\text{H}^+$. Das resultierende Produkt ist das reaktionsbereite Acetyl-Coenzym A (kurz Acetyl-CoA).

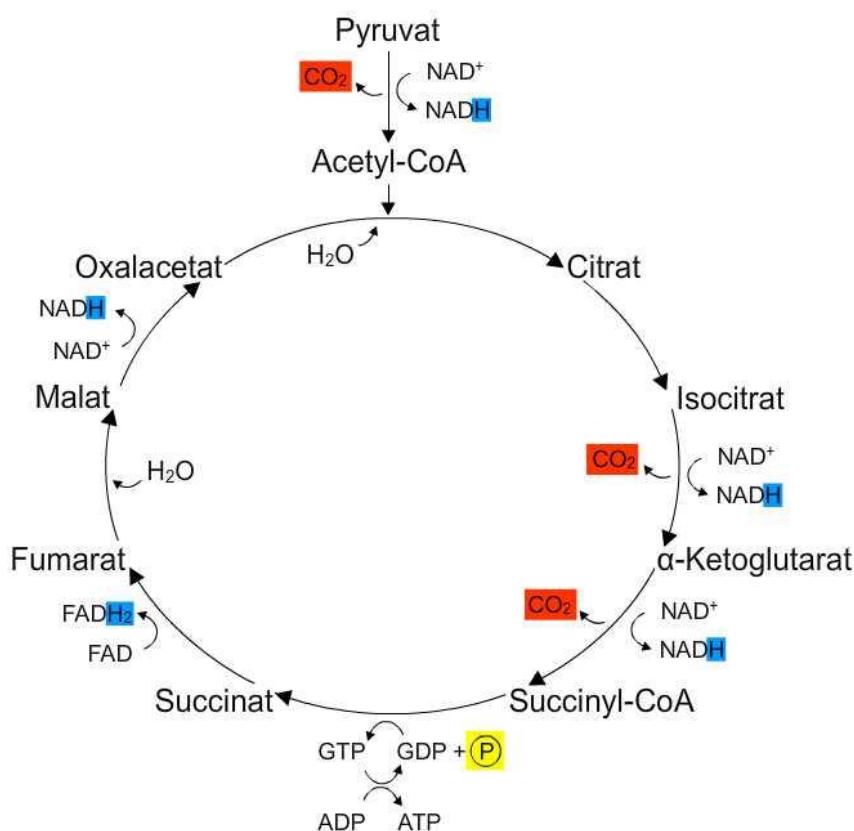


Abb. 1: Der Citratzyklus im Überblick.

Ablauf des Citratzyklus

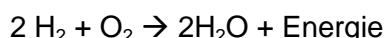
Im Citratzyklus reagiert das Acetyl-CoA mit dem bereits in der Zelle vorhandenen Oxalacetat (Oxalsäure) zu Citrat (daher der Name Citratzyklus), einem Molekül bestehend aus vier Kohlenstoffatomen. Das Citrat wird in mehreren Reaktionsschritten wieder zu Oxalacetat abgebaut. Der Kreislauf beginnt dann wieder von vorne. Zweck dieser Abbauprozesse ist die Gewinnung von Wasserstoff, welcher auf das Coenzym NAD^+ übertragen wird.

Der Abbau von **Citrat** erfolgt über mehrere Oxidationsprozesse (siehe Abb. 1):

- Im ersten Schritt wird Citrat in **Isocitrat** umgebaut. Unter Abspaltung einer Kohlendioxidgruppe oxidiert Isocitrat in α -Ketoglutarat.
- Das **α -Ketoglutarat** oxidiert dann seinerseits, ebenfalls unter Abspaltung einer Kohlendioxidgruppe, zu Succinyl-CoA. Dieser Prozess wird auch oxidative Decarboxylierung genannt.
- Bei der Reaktion von **Succinyl-CoA** (Bernsteinsäure-CoA) zu Succinat wird der Energieüberträger GDP (Guanosindiphosphat) zu GTP phosphoryliert, der wiederrum ein ADP phosphoryliert.
- Aus dem **Succinat** (Bernsteinsäure) wird durch Oxidation Fumarat. Der dabei freigesetzte Wasserstoff wird auf das Coenzym FAD (ähnlich wie NAD⁺) übertragen.
- **Fumarat** reagiert mit Wasser zu Malat.
- **Malat** (Apfelsäure) wird im letzten Reaktionsschritt des Citratzyklus wieder zu Oxalacetat oxidiert. Wasserstoffakzeptor ist hier wieder NAD⁺.
- Das **Oxalacetat** wird nun wieder für einen neuen Kreislauf genutzt.

Atmungskette bzw. oxidative Phosphorylierung

Das bei Glykolyse und Citratzyklus entstandene NADH+H⁺ wird an der inneren Mitochondrienmembran mit dem eingeatmeten Luftsauerstoff (O₂) oxidiert. Die Reaktion entspricht formal der Knallgasreaktion und setzt große Mengen Energie frei:



Diese Energie darf aber nicht auf einen Schlag freigesetzt werden, da es sonst zu einer Explosion innerhalb der Zelle käme, die diese zerstören würde. Deshalb läuft die Reaktion über eine Kette aufeinanderfolgender biochemischer Redoxreaktionen ab. Dabei werden Elektronen an der inneren Mitochondrienmembran zwischen vier Proteinkomplexen übertragen, sodass immer nur ein verträglicher Teil der gesamten Reaktionsenergie frei wird. Diese Energie dient dazu, Protonen (H⁺-Ionen) von der Mitochondrienmatrix (Flüssigkeit im Mitochondrium) in den Intermembranraum des Mitochondriums zu pumpen. Die Protonen haben jedoch das Bestreben, mit den Elektronen zu reagieren. Es kommt zu einem Protonenfluss im Intermembranraum entlang der inneren Mitochondrienmembran. Der Rückfluss der Protonen in die Mitochondrienmatrix wird über das Enzym ATP-Synthase gesteuert, das die freie Energie zur Bildung von ATP nutzt. Dieser Prozess wird **oxidative Phosphorylierung** genannt. In der Mitochondrienmatrix reagieren nun die zurückflossenen Protonen und Elektronen mit Sauerstoff kontrolliert zu Wasser.

Zusammenfassung

Die Reaktionsprodukte des menschlichen Stoffwechsels – Kohlenstoffdioxid und Wasser – entstehen in zwei unterschiedlichen Stoffwechselvorgängen. Während das Kohlenstoffdioxid bereits im Citratzyklus entsteht, wird das Wasser am Ende der Atmungskette gebildet. Bei den Reaktionen in den Mitochondrien entsteht außerdem das reduzierte Coenzym NADH+H⁺, dessen Oxidation mit Sauerstoff die Energie für die ATP-Synthese liefert.