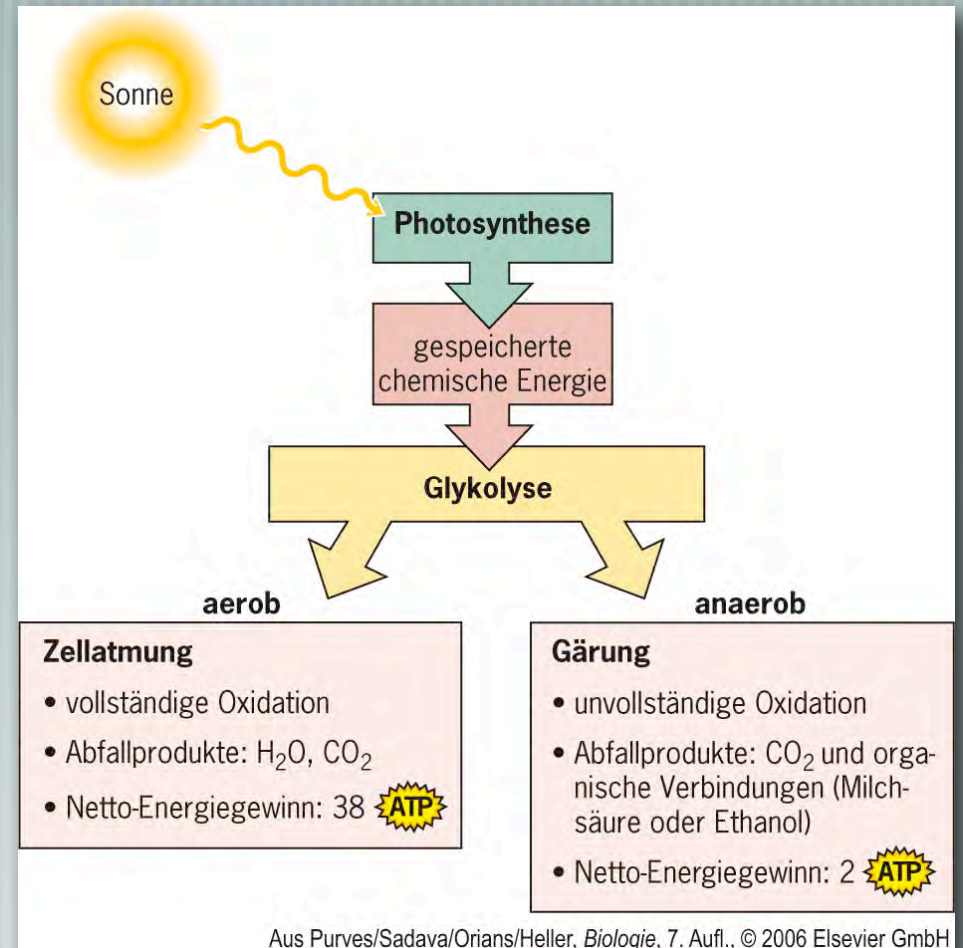


# Zellatmung

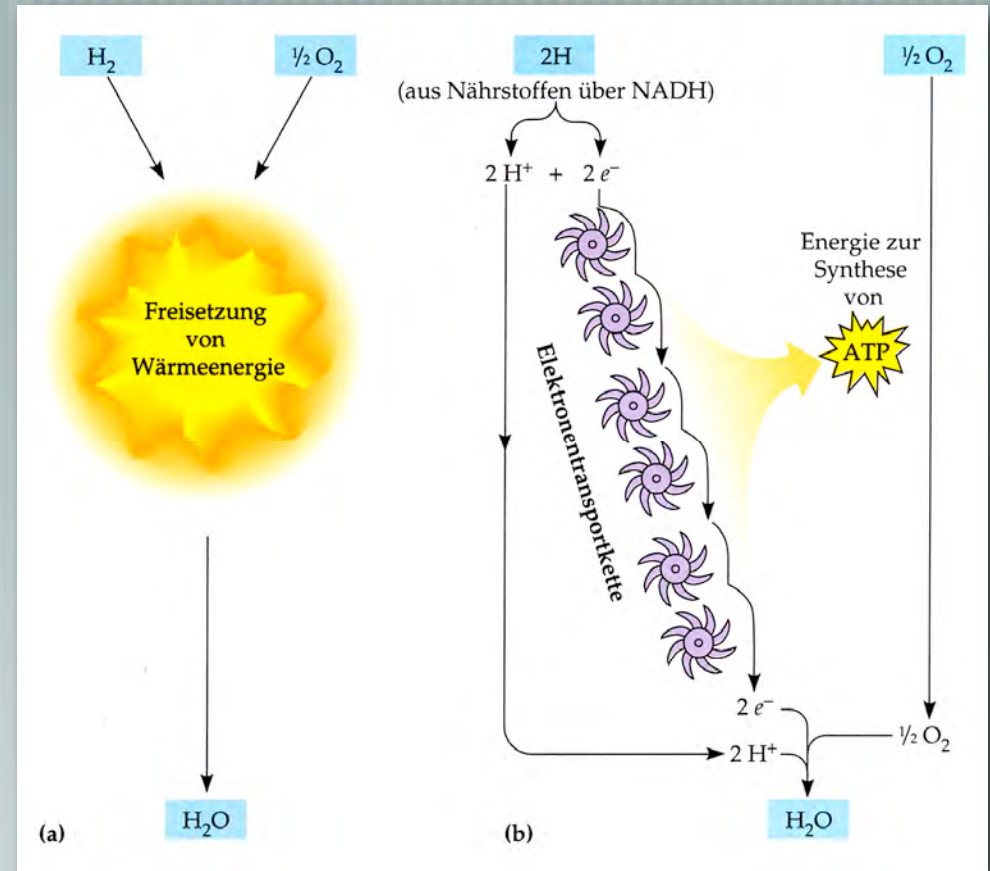
# Zellatmung und Gärung sind katabole Stoffwechselwege

- Der Abbau der Glucose und anderer organischer Substrate im Stoffwechsel ist exergonisch und liefert Energie für die ATP-Synthese.
- In der Zellatmung wird Glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) zu  $CO_2$  oxidiert, und  $O_2$  wird zu  $H_2O$  reduziert.
- Die Elektronen verlieren bei der Übertragung von den organischen Verbindungen zum Sauerstoff potentielle chemische Energie.
- Diese Energie treibt die ATP-Synthese an.



# Der Elektronenfluss bei der Zellatmung verläuft kaskadenartig über $\text{NAD}^+$ und eine Elektronentransportkette

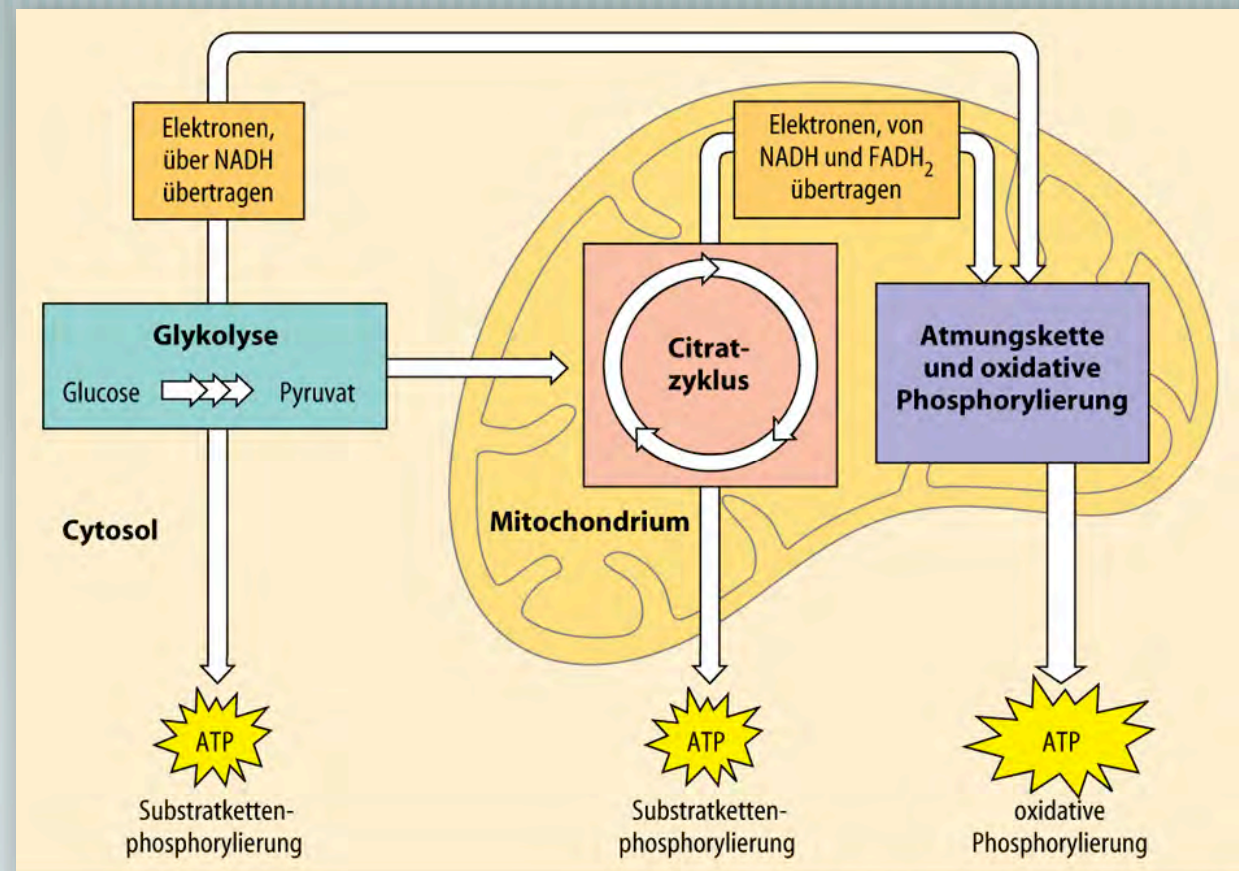
- Die den Nährstoffmolekülen entzogenen Elektronen werden in der Regel zunächst auf  $\text{NAD}^+$  übertragen, das dadurch zu  $\text{NADH}$  reduziert wird.
- Das  $\text{NADH}$  gibt die Elektronen an eine Elektronentransportkette, die Atmungskette, weiter. Diese leitet die Elektronen in mehreren Schritten, bei denen jeweils Energie freigesetzt wird, zum Sauerstoff.
- Die Energie dient der oxidativen Phosphorylierung von  $\text{ADP}$ , wodurch  $\text{ATP}$  gebildet wird.



# Zellatmung ist der Funktionskomplex aus Glycolyse, Citratzyklus und Atmungskette

Glycolyse und Citratzyklus liefern (über das NADH) Elektronen an die Atmungskette, und diese treibt die oxidative Phosphorylierung an.

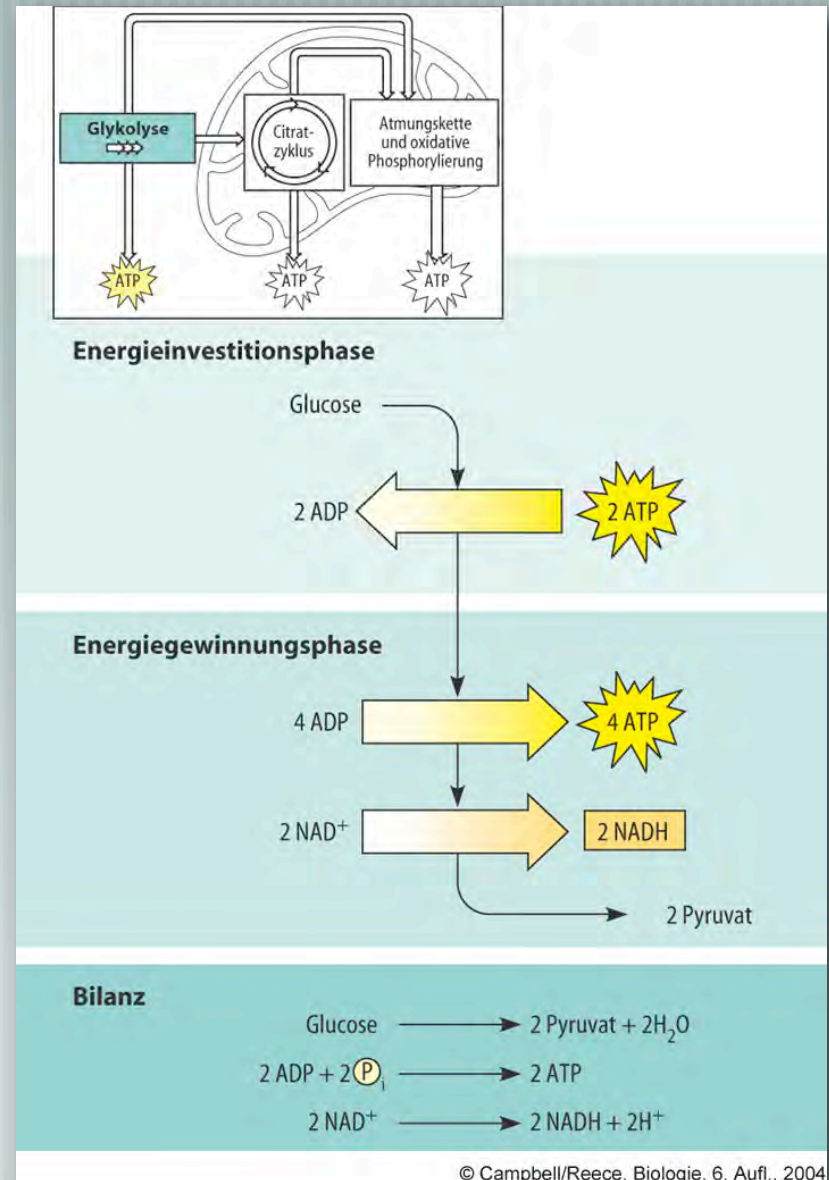
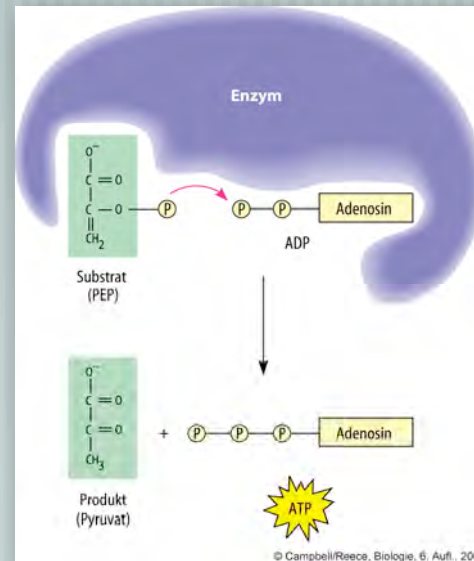
Die Glycolyse läuft im Cytosol ab, der Citratzyklus dagegen in der Mitochondrienmatrix. Die Atmungskettenenzyme sind in der inneren Mitochondrienmembran lokalisiert.



# In der Glycolyse wird Energie durch die Oxidation von Glucose zu Pyruvat freigesetzt

In der Glycolyse entstehen aus einem Glucosemolekül unter dem Strich zwei Moleküle NADH und durch Substratketten-Phosphorylierung zwei Moleküle ATP.

Eine gewisse Menge ATP entsteht durch direkte enzymatische Übertragung einer Phosphatgruppe von einem Substrat auf ATP.  
 ↳ Substratketten-Phosphorylierung

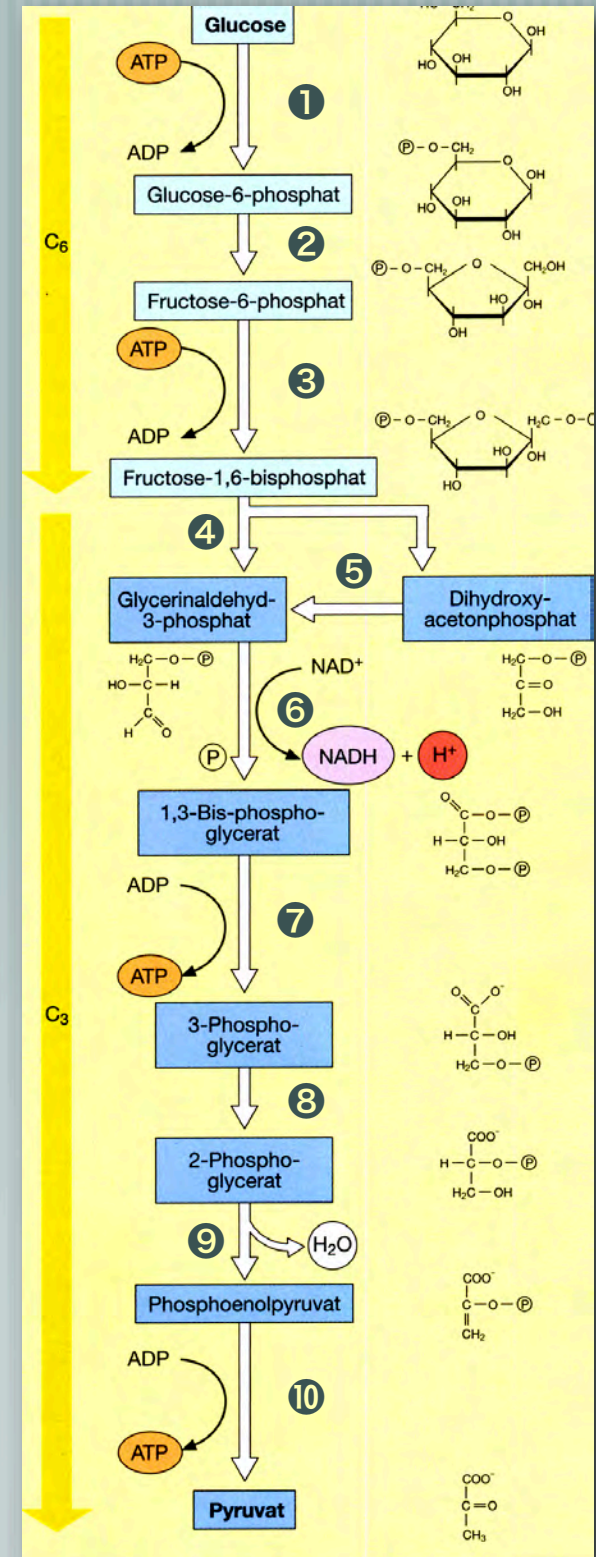
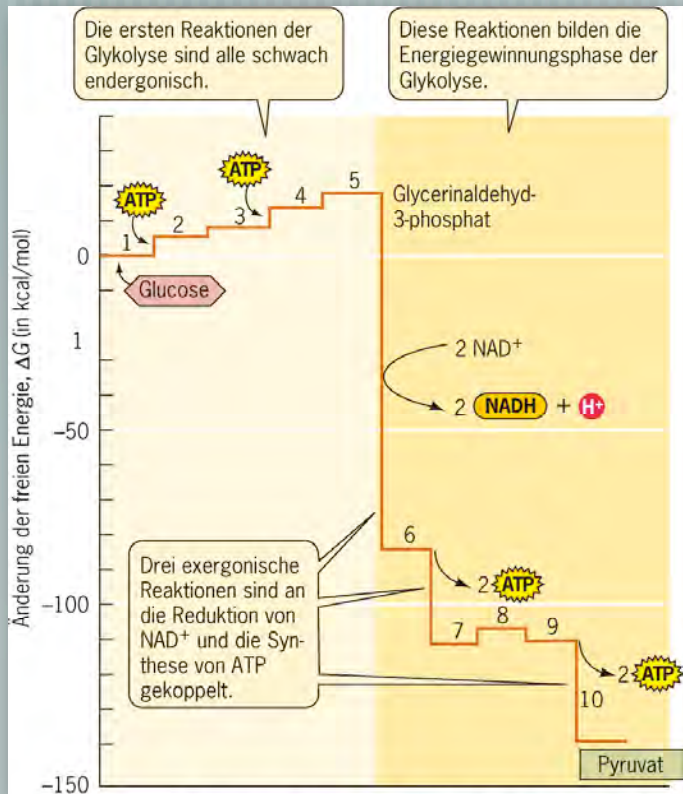


# Glykolyse

In der Glykolyse wird die Glukose in mehreren Schritten zu Pyruvat abgebaut.

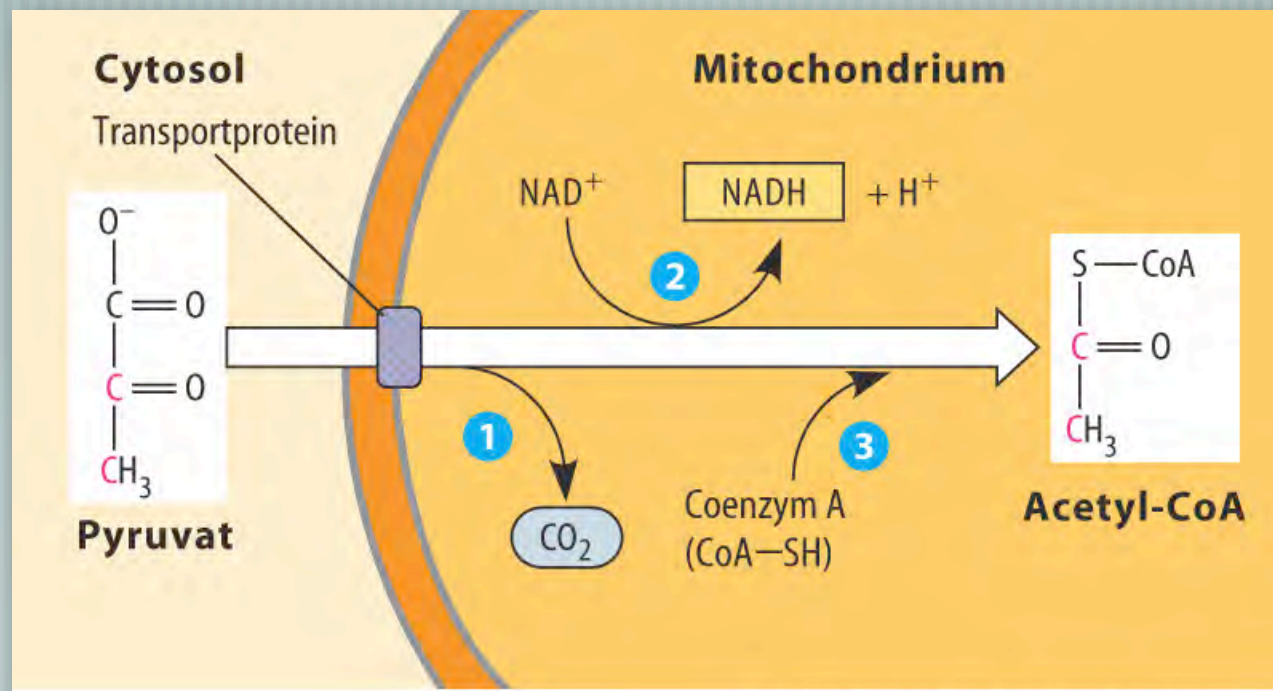
Am Anfang muss Aktivierungsenergie investiert werden, die aber im späteren Verlauf wieder zurückgewonnen wird.

$\Delta G$  der gesamten Reaktion ist negativ  $\implies$  exergonische Reaktion.

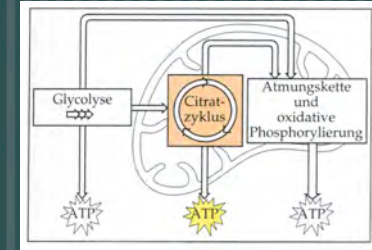


# Bindeglied zwischen Glycolyse und Citratzyklus

- Das Bindeglied zwischen Glycolyse und Citratzyklus ist die Reaktion von Pyruvat mit Coenzym A, wodurch aktiviertes AcetylCoA entsteht.



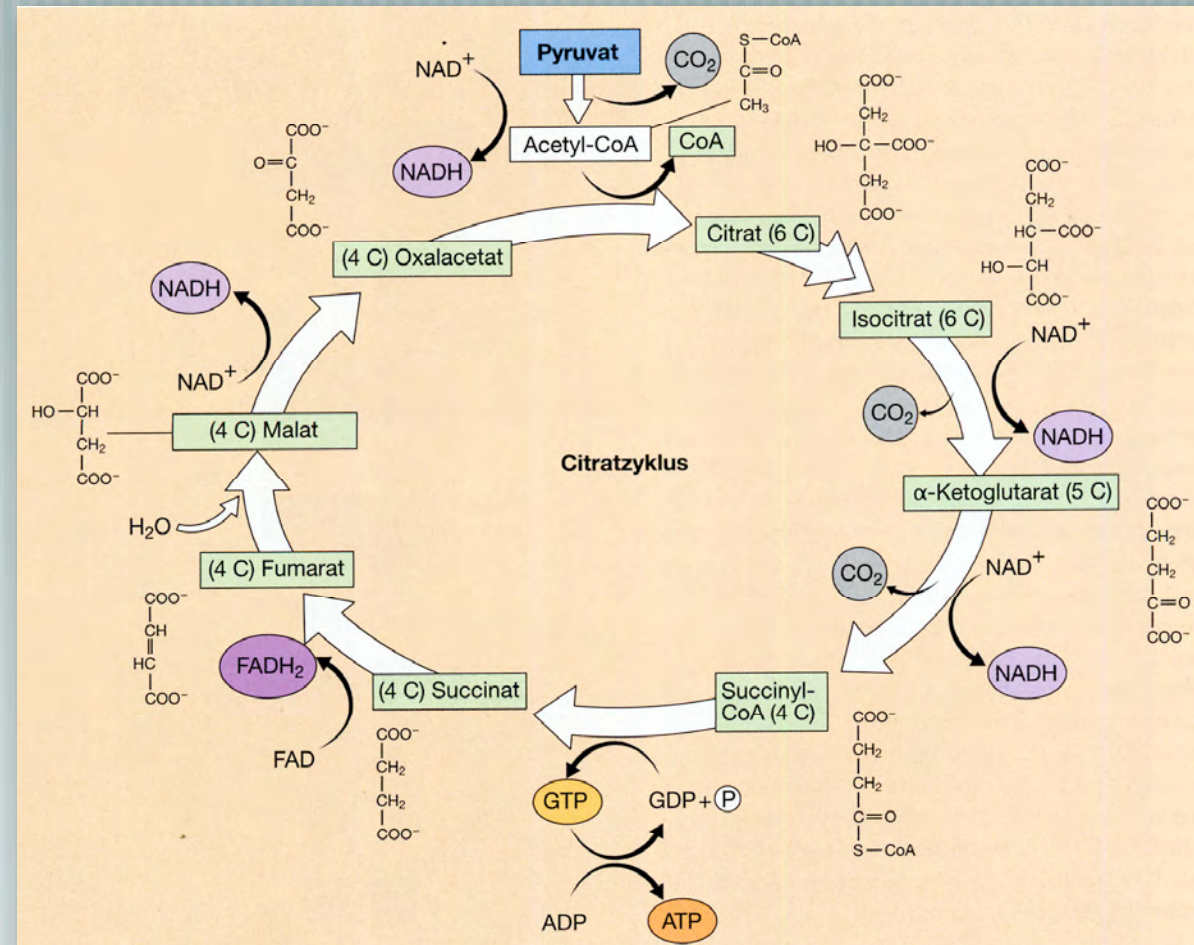
# Der Citratzyklus vervollständigt die energieliefernde Oxidation organischer Moleküle



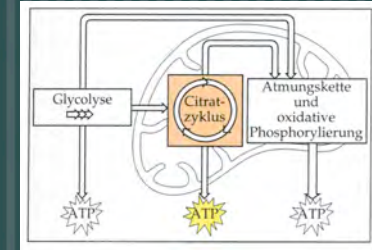
Das Acetyl-CoA überträgt die Acetylgruppe auf Oxalacetat, einem Molekül mit vier Kohlenstoffatomen, wodurch Citrat mit sechs Kohlenstoffatomen entsteht.

Dieses wird anschliessend in mehreren Schritten, die einen vollen Durchgang des Zyklus bilden, wieder in Oxalacetat verwandelt.

Dabei wird Kohlendioxid abgespalten, durch Substratketten-phosphorylierung entsteht pro Acetylgruppe ein ATP-Molekül, und Elektronen werden auf drei NAD<sup>+</sup>-Moleküle und ein FAD<sup>+</sup>-Molekül, einen weiteren Elektronenakzeptor, übertragen.



# Der Citratzyklus im Überblick



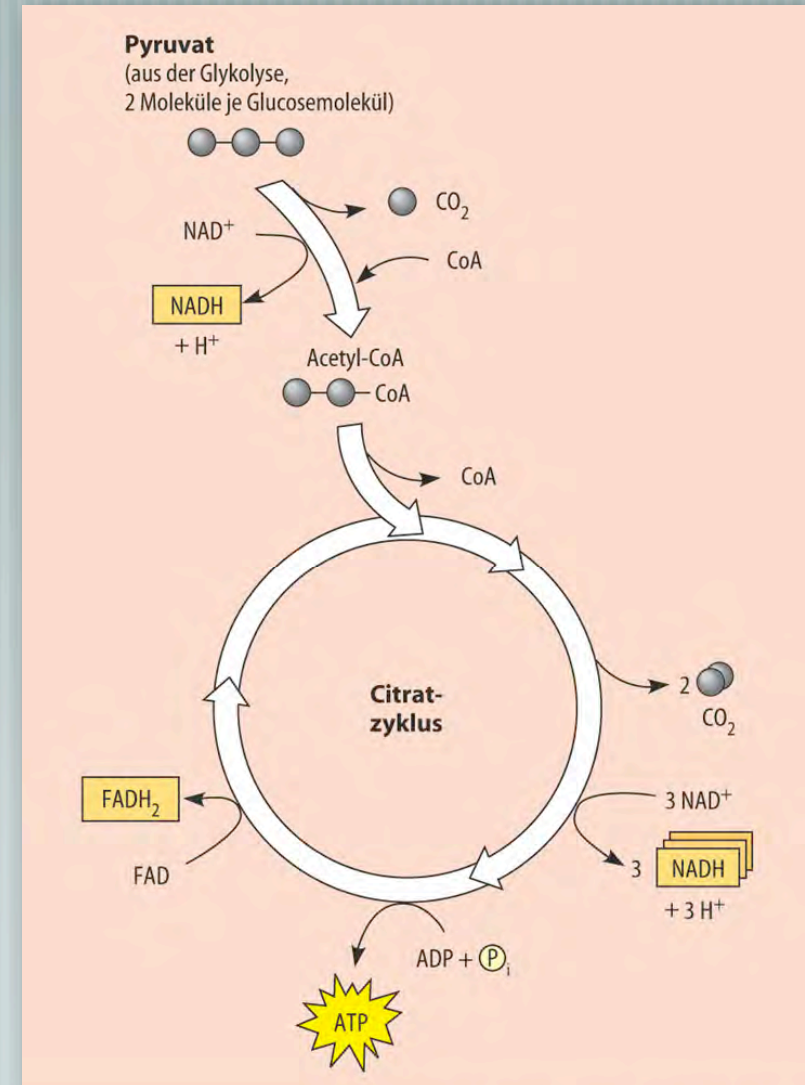
Der Citratzyklus ist ein zentrales Drehkreuz des Stoffwechsels, in dem die energiereiche Acetylgruppe schrittweise oxidiert wird.

Das Schema zeigt zusammenfassend die Ausgangsstoffe und Produkte des Zyklus, in dem ein Pyruvatmolekül zu drei  $\text{CO}_2$ -Molekülen abgebaut wird.

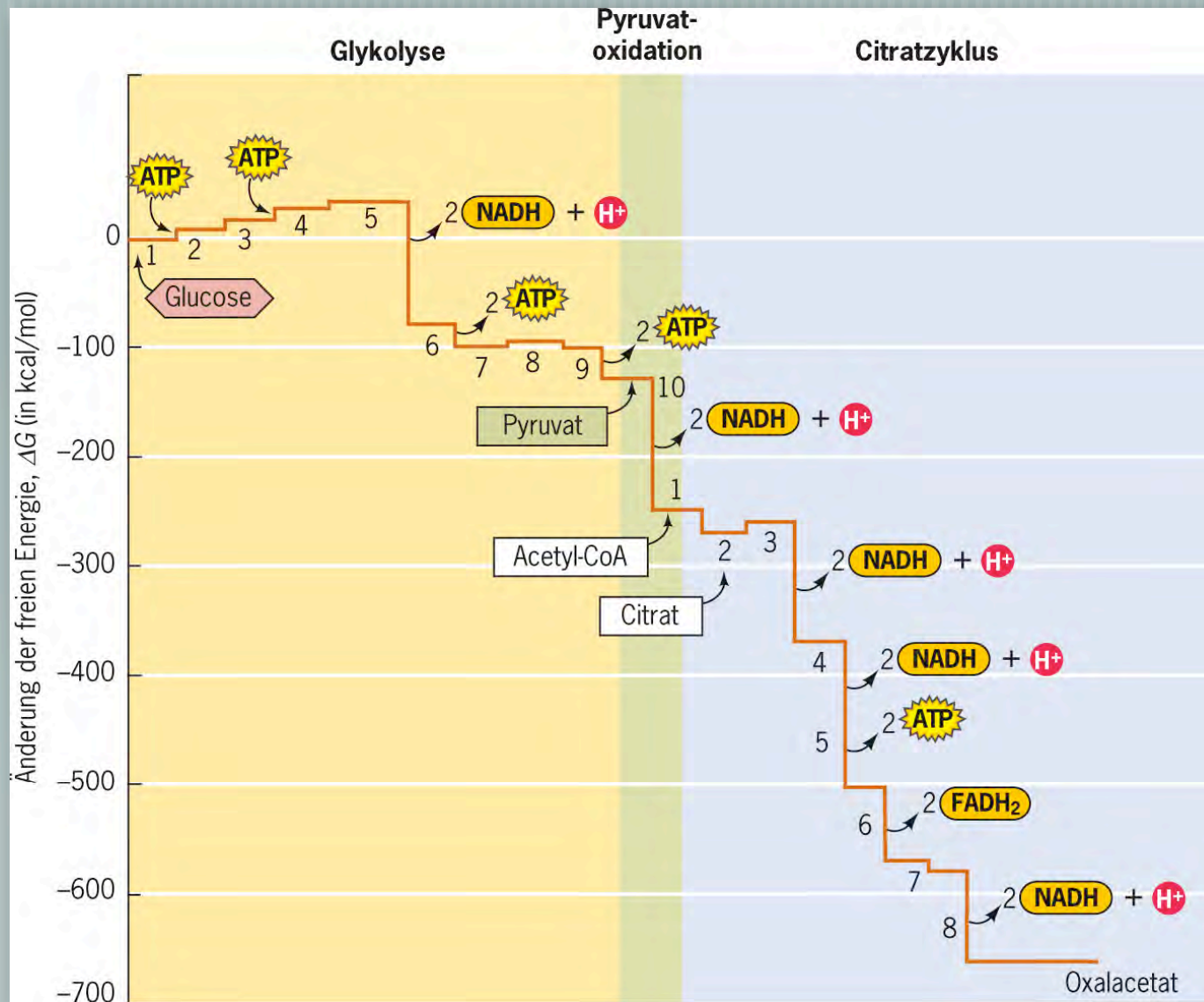
In jedem Durchgang des Zyklus entsteht ein ATP-Molekül durch Substratkettenphosphorylierung.

Der grösste Teil der chemischen Energie wird in Redoxreaktionen auf NAD und FAD übertragen.

Die reduzierten Coenzyme NADH und  $\text{FADH}_2$  liefern ihre Fracht aus energiereichen Elektronen an die Atmungskette, die mithilfe dieser Energie durch oxidative Phosphorylierung ATP erzeugt.



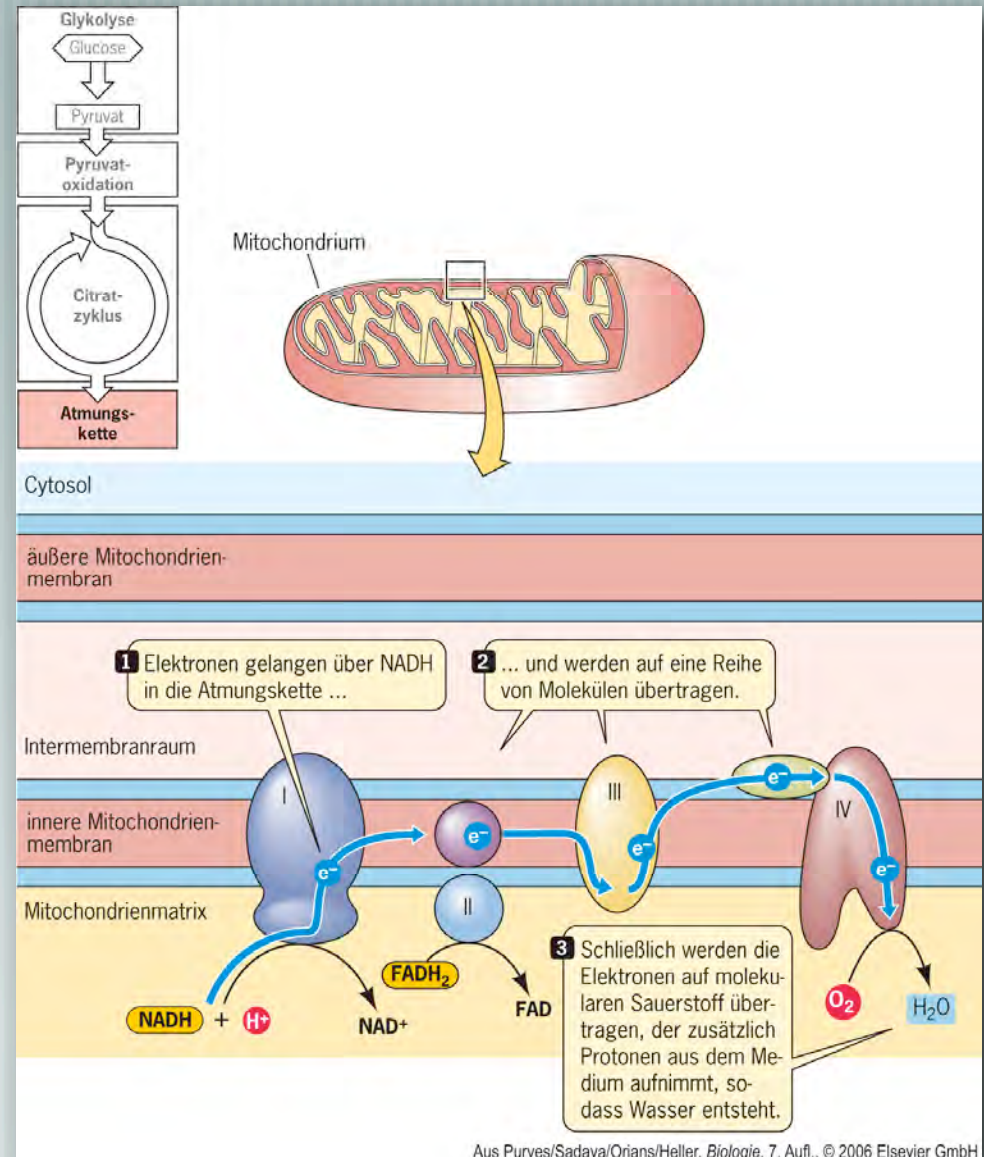
# Energiebilanz von Glykolyse und Citratzyklus



# Atmungskette: Energiereiche Elektronen werden auf Proteine der inneren Mitochondrienmembran übertragen

Die durch den Glucoseabbau freiwerdende Energie wird zur ATP-Synthese durch oxidative Phosphorylierung verwendet.

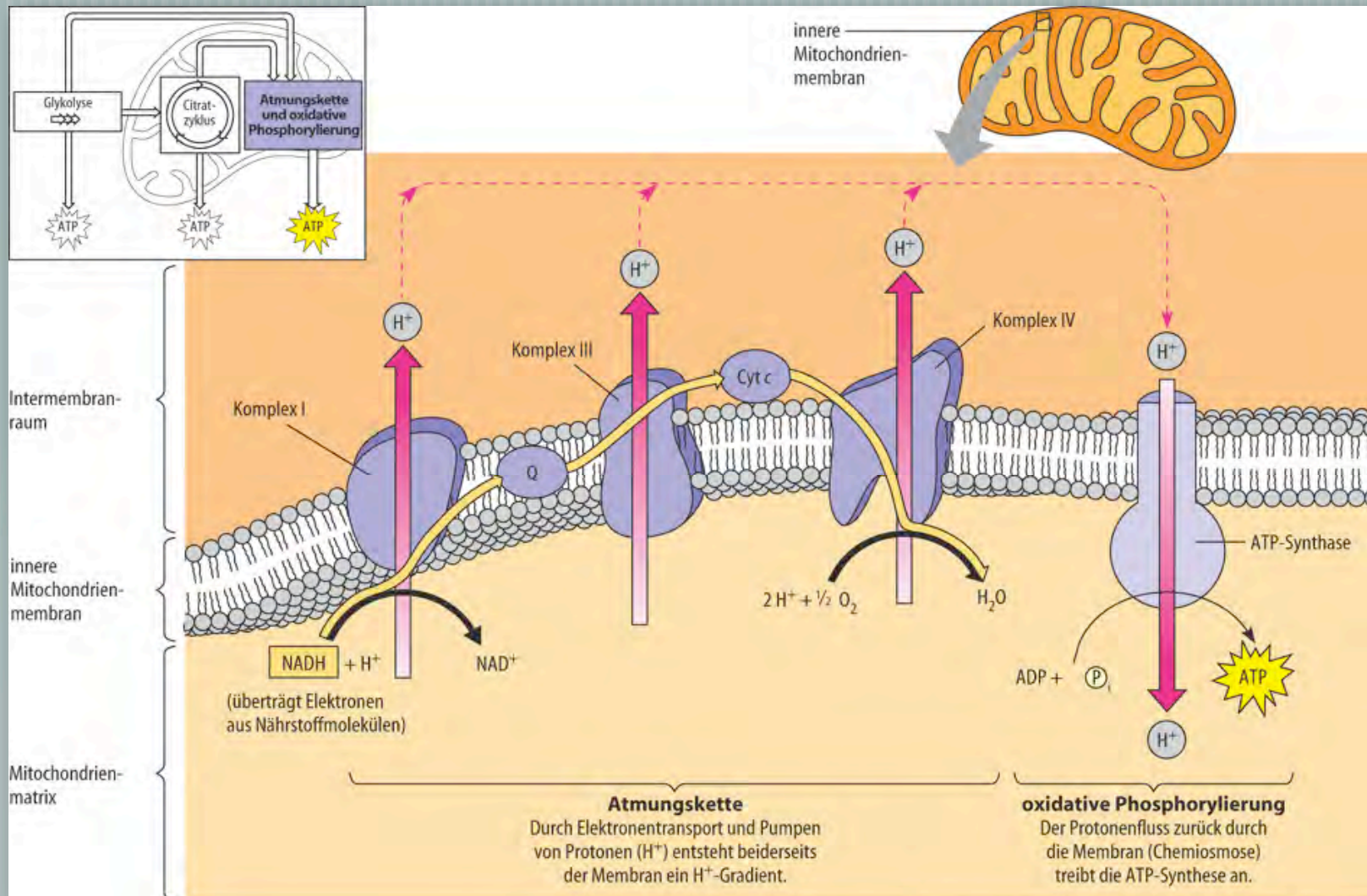
Dabei geben zunächst NADH und FADH<sub>2</sub> ihre Elektronen an die Atmungskettenproteine ab, welche in die innere Mitochondrienmembran eingebettet sind.



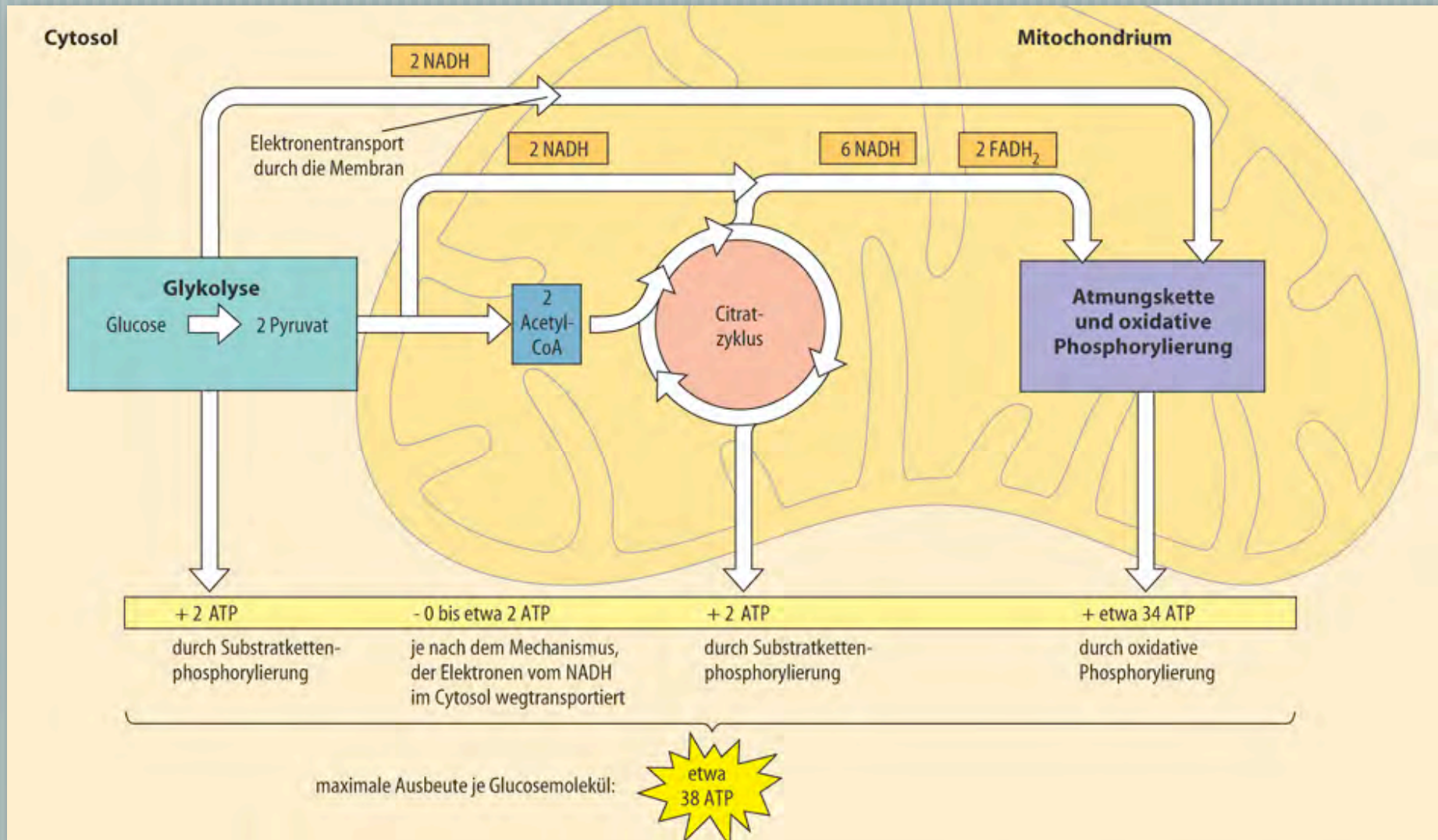
# Atmungskette: Der stufenweise Elektronentransport in der Atmungskette ist an die ATP-Synthese gekoppelt

- ➊ Aufgrund ihrer Anordnung verschieben die Elektronenüberträger an bestimmten Punkten der Kette während des Elektronentransports H-Ionen aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum, und dabei wird Energie als Protonengradient gespeichert.
- ➋ Dieser Gradient ergibt zusammen mit dem Membranpotential eine protonenmotorische Kraft.
- ➌ Getrieben von dieser Kraft diffundieren die Protonen durch einen Kanal in der ATP-Synthase zurück in die Matrix. Dieser exergonische Protonenfluss durch den membrangebundenen Enzymkomplex treibt die endergonische Phosphorylierung des ADP an.

# Atmungskette: Ein Überblick

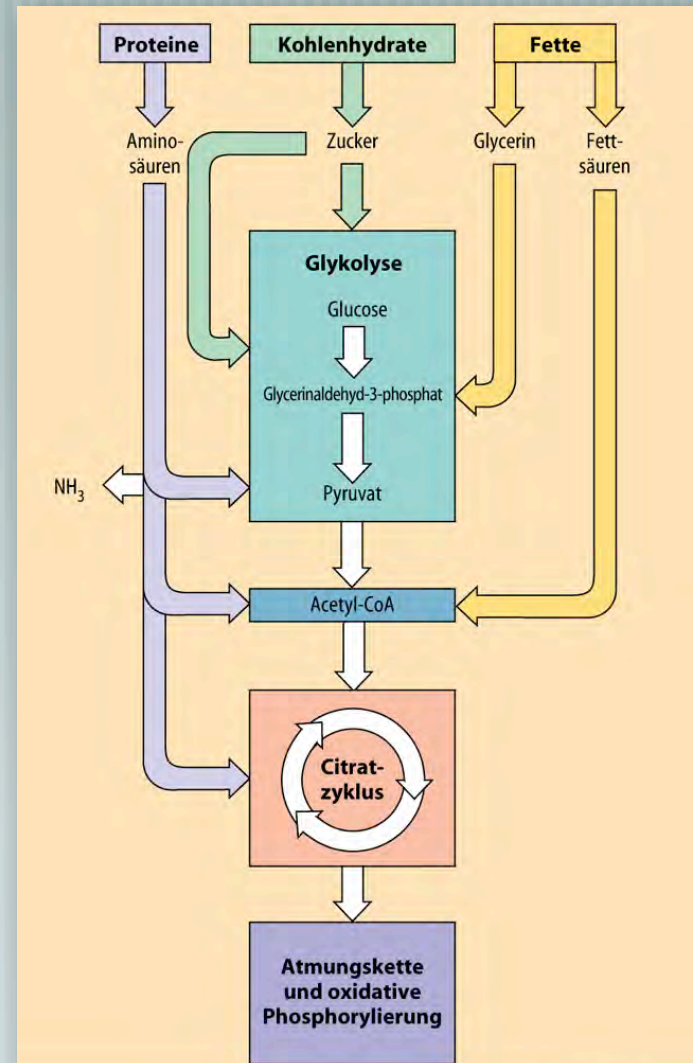


# Durch die Zellatmung werden für jedes oxidierte Glucosemolekül maximal 38 ATP-Moleküle gebildet



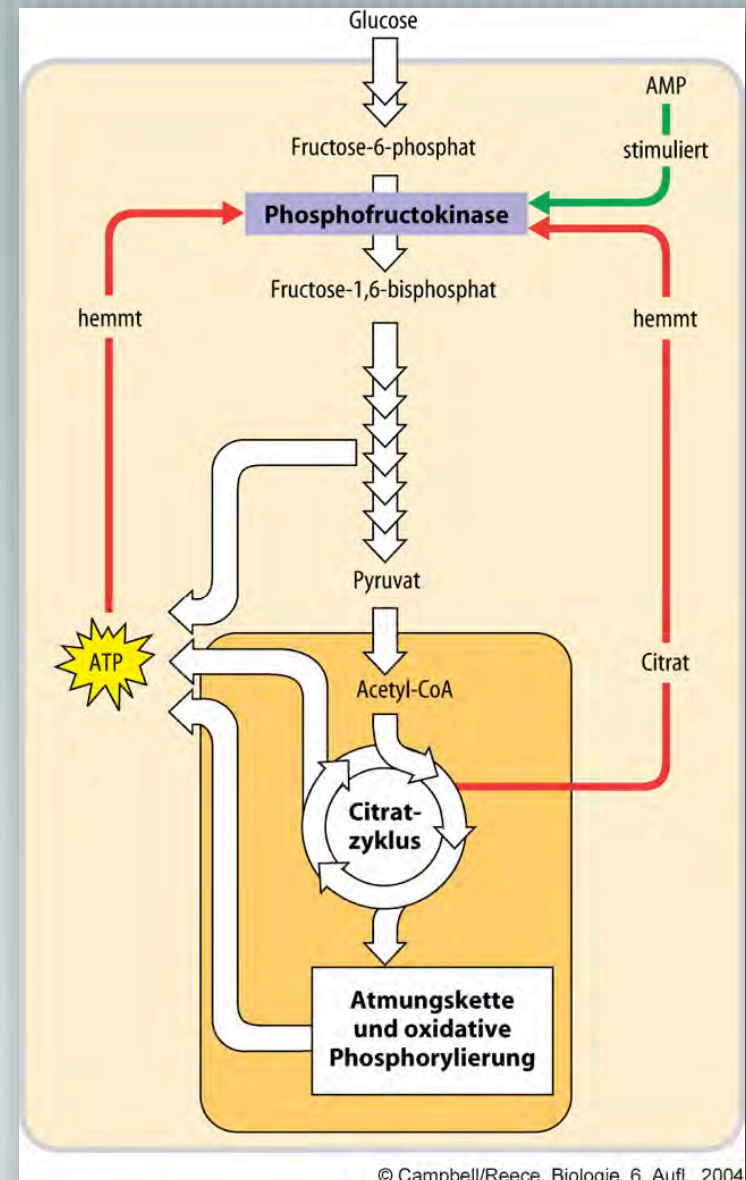
# Glycolyse und Citratzyklus sind mit vielen anderen Stoffwechselwegen verknüpft

- Bei der Zellatmung werden Fette, Proteine und Kohlenhydrate zur Herstellung von ATP verbraucht.
- Glycolyse und Citratzyklus sind also katabole Stoffwechselwege, auf denen energiereiche Elektronen von Nährstoffmolekülen aller Art über NADH beziehungsweise  $\text{FADH}_2$  in die Atmungskette eingeschleust und so für die ATP-Synthese nutzbar gemacht werden.



# Die Zellatmung wird durch Rückkopplungsmechanismen gesteuert

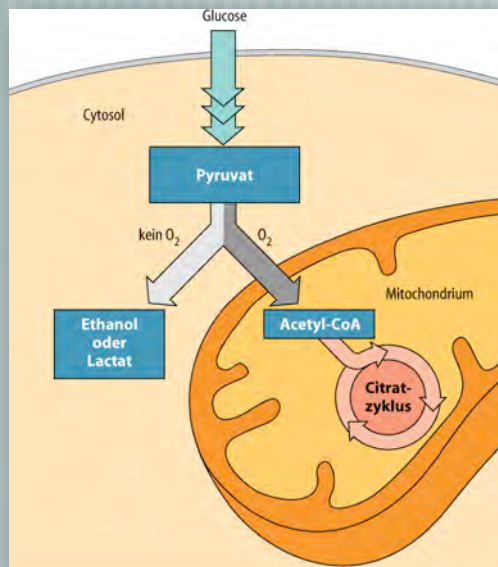
- Die Zellatmung wird an entscheidenden Punkten von Glycolyse und Citratzyklus durch Aktivierung und Hemmung allosterischer Enzyme reguliert.
- Diese permanente Steuerung sorgt kontinuierlich für ein ausgewogenes Verhältnis von Katabolismus und Anabolismus.



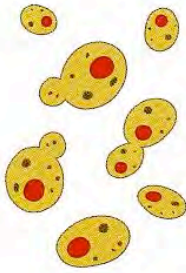

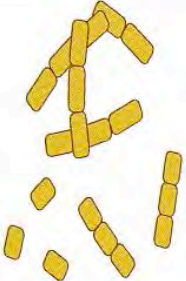

# Gärung: Abbau von organischen Nährstoffe ohne Sauerstoff

Hefepilze und manche Bakterien sind fakultative Anaerobier.

Sie können ATP entweder durch aerobe Zellatmung oder aber durch Gärung herstellen.



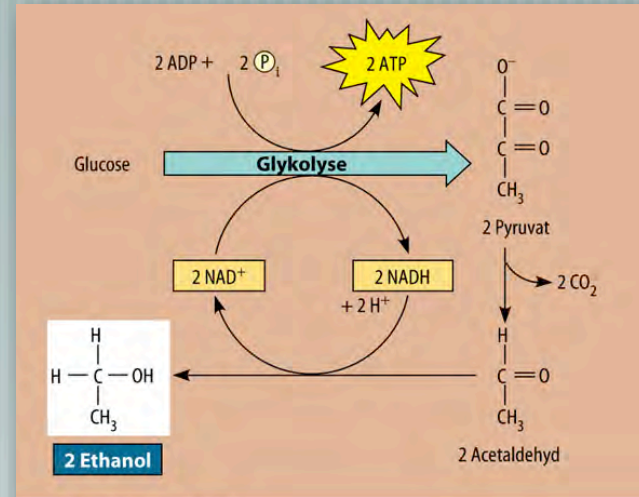
Bei der Gärung entstehen als Abbauprodukte entweder Alkohol oder Milchsäure.

$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H} - \text{C} - \text{OH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$		
2 Ethanol	Hefezellen	
$\begin{array}{c} \text{O}^- \\   \\ \text{C} = \text{O} \\   \\ \text{H} - \text{C} - \text{OH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$		
2 Milchsäure	Milchsäurebakterien	

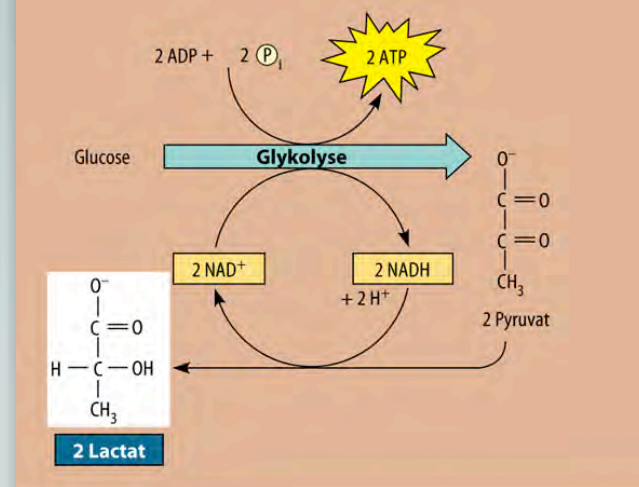
# Gärung liefert ATP aus der Glycolyse.

Die Elektronen werden vom NADH auf Ethanol oder Lactat übertragen. Dabei wird das NAD, welches als Oxidationsmittel für die Glykolyse gebraucht wird, wiederhergestellt.

Diese Form der Energiegewinnung ist nicht sehr effizient: sie liefert nur 2 ATP, hält aber den Stoffwechsel in Gang.



(a) alkoholische Gärung



(b) Milchsäuregärung