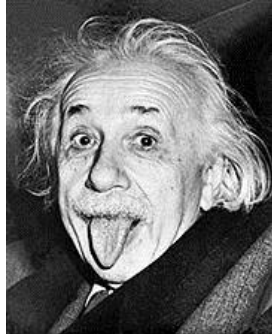
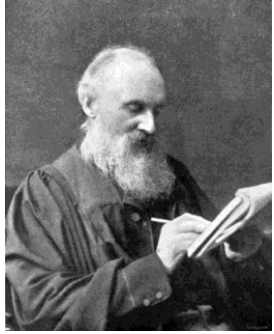




# 1 Physikalische Prinzipien der biologischen Energieumwandlung

---

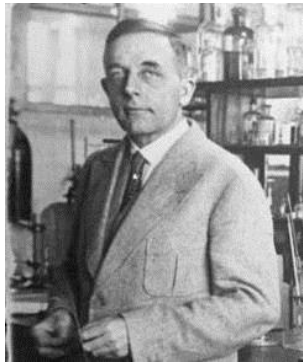


## Physik:

Energie – Fähigkeit, Arbeit zu verrichten

## Biochemie:

Energie – Fähigkeit, Materie zu verändern



## Potenzielle Energie :

Energie des Zustandes oder der Lage  
d.h. gespeicherte Energie

in chemischen Bindungen  
Konzentrationsgradient  
elektrisches Ladungsungleichgewicht



## Kinetische Energie :

Energie die Arbeit leistet  
d.h. Veränderung von Position oder Bewegungs-  
zustand von Materie

Muskelkontraktion



## Metabolismus

```
graph TD; Metabolismus --> Anabole_Reaktionen[Anabole Reaktionen]; Metabolismus --> Katabole_Reaktionen[Katabole Reaktionen]; Anabole_Reaktionen <--> Katabole_Reaktionen;
```

### Anabole Reaktionen

Verknüpfen einfacher Moleküle  
zu komplexeren

Bspw. Proteinsynthese aus  
Aminosäuren

Benötigen Energiezufuhr

Speichern Energie in den  
Molekülen

### Katabole Reaktionen

Bauen komplexe Moleküle ab

Setzen Energie frei

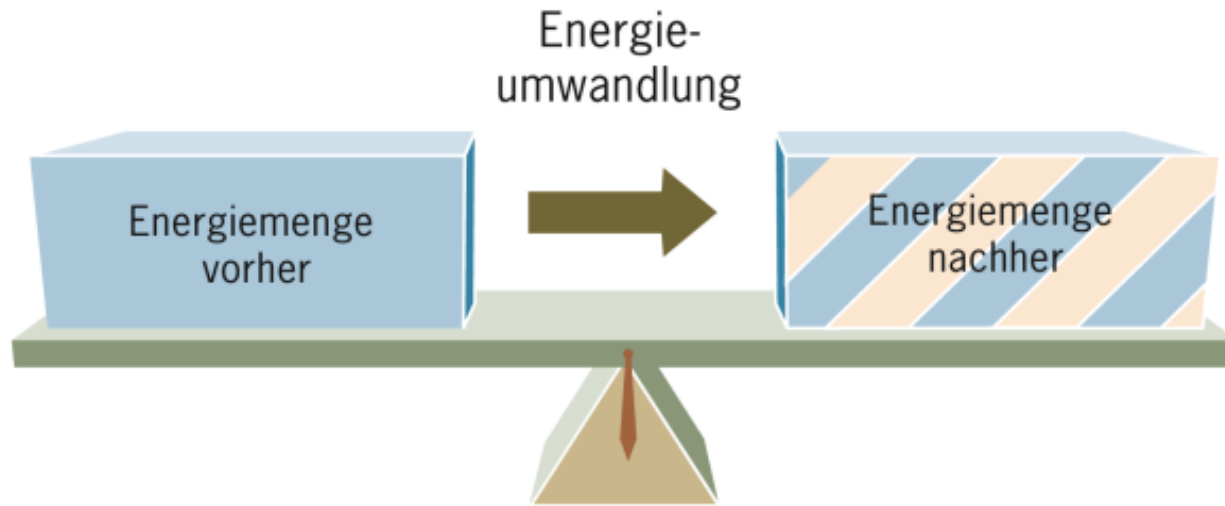
Bspw. Hydrolysieren von Stärke



1

Physikalische  
Prinzipien der  
biologischen  
Energieumwandlung

# 1. Hauptsatz der Thermodynamik



a)

## **Der erste Hauptsatz der Thermodynamik.**

Im geschlossenen System (ein System, das keine Energie oder Materie mit seiner Umgebung austauscht) ist bei einer Energieumwandlung die Gesamtenergie vorher und nachher gleich. Es wird keine Energie erzeugt oder vernichtet.

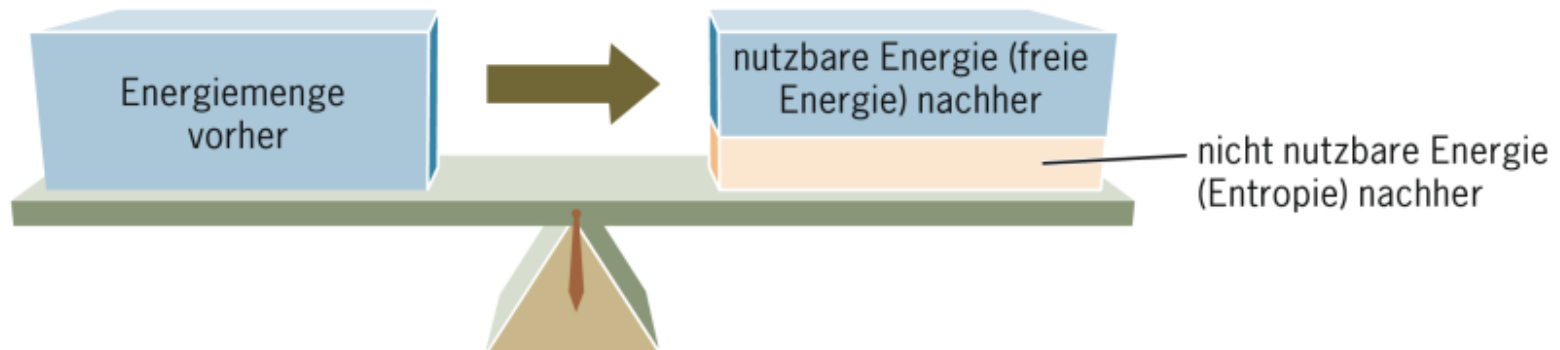
Bsp.

Potentielle Energie von Kohlehydraten und Lipiden in potentielle Energie in Form von ATP, diese dann in kinetische Energie wie mechanische Arbeit in Muskelkontraktion oder biochemische Arbeit wie Protein-Biosynthese

1

Physikalische  
Prinzipien der  
biologischen  
Energieumwandlung

## 2. Hauptsatz der Thermodynamik



b)

### **Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.**

Obwohl eine Energieumwandlung die Gesamtmenge an Energie in einem geschlossenen System nicht verändert, ist nach der Umwandlung die Menge an Energie, die für das Verrichten von Arbeit zur Verfügung steht, stets geringer als vor der Umwandlung.

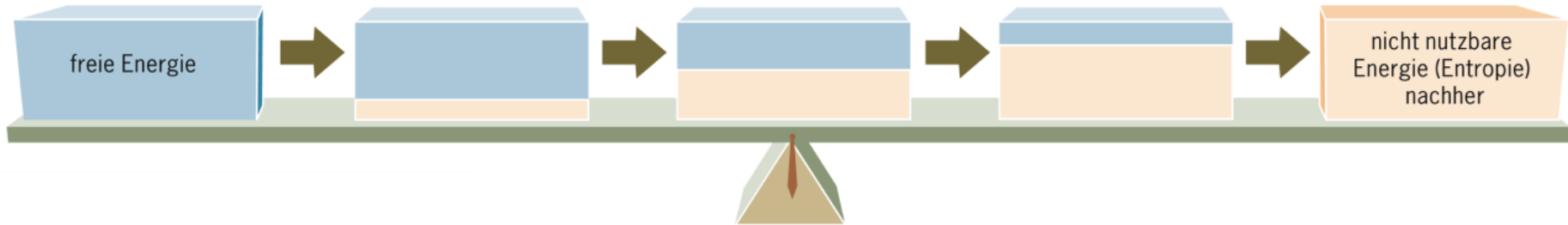
Kein physikalischer Prozess, keine chemische Reaktion ist 100% effizient

Teil der Energie geht in Form der Unordnung über

1

Physikalische  
Prinzipien der  
biologischen  
Energieumwandlung

## 2. Hauptsatz der Thermodynamik



Eine weitere Aussage des zweiten Hauptsatzes ist:  
In einem geschlossenen System, in dem wiederholt  
Energieumwandlungen stattfinden, nimmt die Menge  
an freier Energie ab und die Menge an nicht nutzbarer  
Energie (Entropie) zu.

Gesamtenergie = nutzbare Energie + nicht nutzbare Energie

H ... **Enthalpie**

G ... freie Energie

S ... **Entropie**

T... absolute Temperatur

$$H = G + TS \quad \text{bzw.} \quad G = H - TS$$

Wir messen Änderung ( $\Delta$ ):

$$\Delta G_{\text{Reaktion}} = G_{\text{Produkte}} - G_{\text{Reaktanden}}$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$\Delta G < 0$  ... Abgabe freier Energie

$\Delta G > 0$  ... Aufnahme freier Energie



...ein Teil der Energie geht durch zufällige thermische Bewegung (**Entropie**)  
verloren

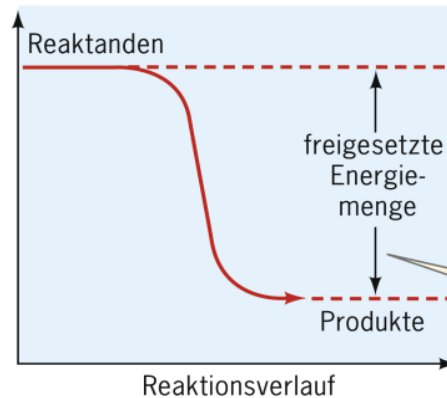
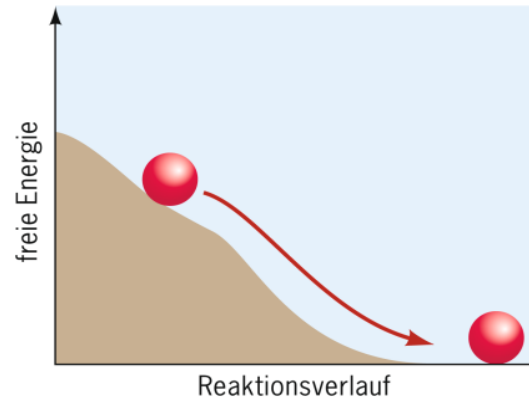
Die Neigung zu Unordnung gibt physikalischen Prozessen und chemischen  
Reaktionen eine Richtung

Ausmaß an Komplexität bspw. des menschlichen Körpers steht im  
Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik?

**NEIN**

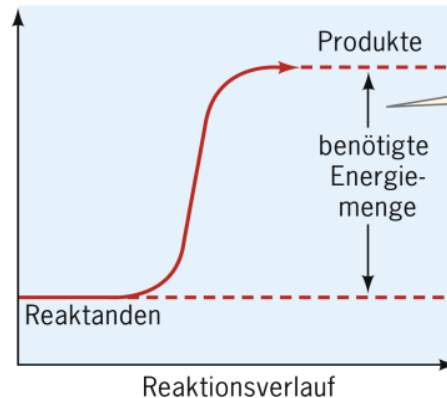
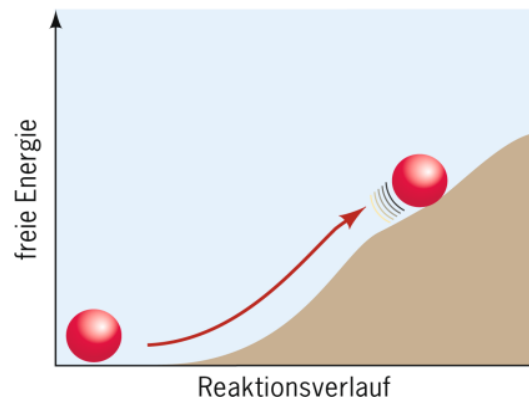
# Chemische Reaktionen setzen Energie frei oder verbrauchen sie

## a) exergonische Reaktion



Bei einer exergonischen Reaktion wird Energie freigesetzt, da die Reaktanden Produkte bilden, die weniger Energie enthalten.  $\Delta G$  ist negativ.

## b) endergonische Reaktion



Bei einer endergonischen Reaktion muss Energie zugeführt werden, da die Reaktanden in Produkte mit höherem Energieniveau umgewandelt werden.  $\Delta G$  ist positiv.

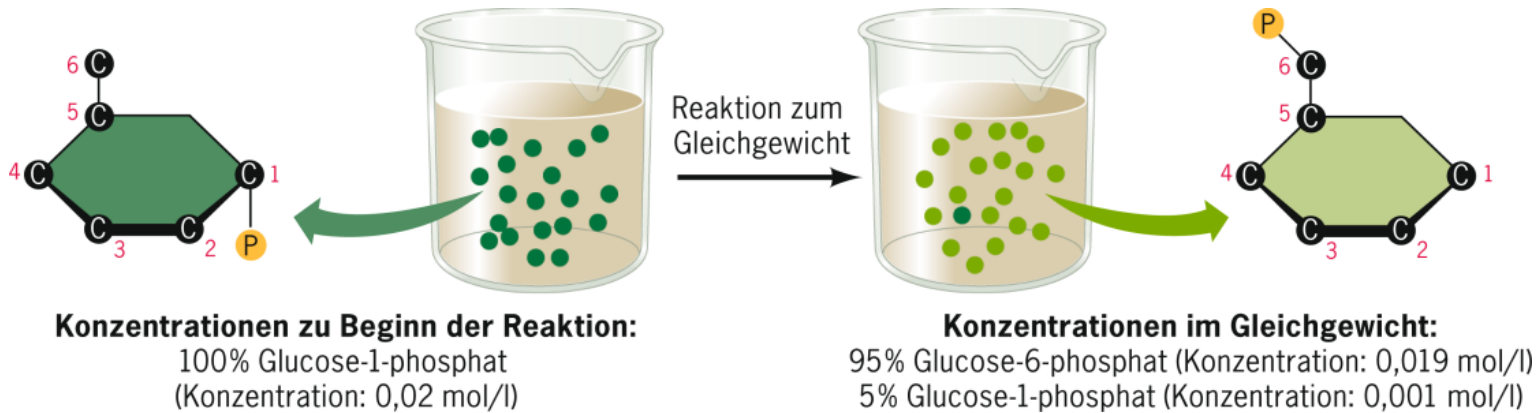
Chemische Reaktionen sind reversibel – **Chemisches Gleichgewicht** mit  $\Delta G = 0$

1

Physikalische  
Prinzipien der  
biologischen  
Energieumwandlung

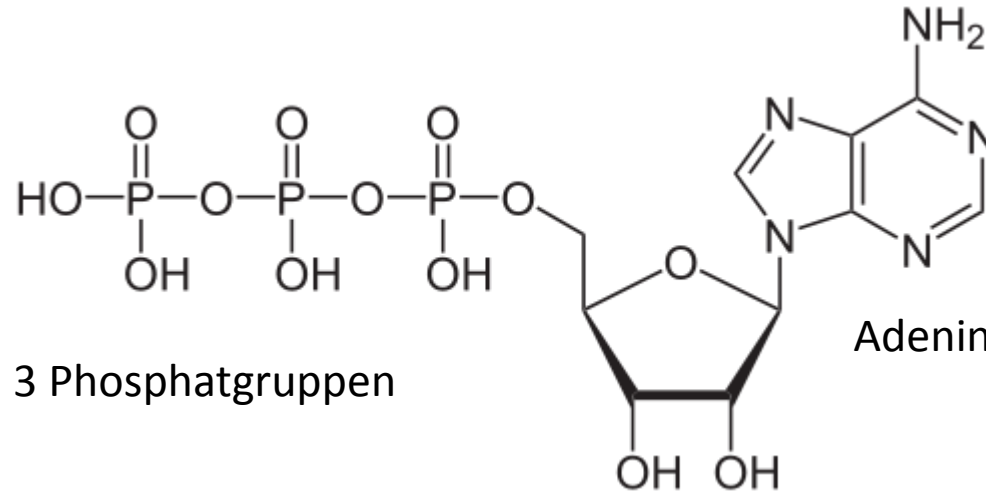
# Chem. Gleichgewicht und freie Energie sind eng miteinander verknüpft

Glucose-1-phosphat  $\rightleftharpoons$  Glucose-6-phosphat



## 2 Rolle des ATP bei der biochemischen Energieübertragung

**ATP**



3 Phosphatgruppen

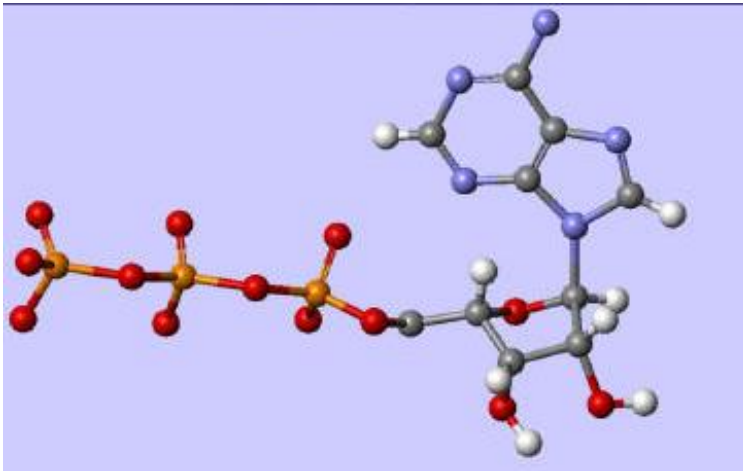
Ribose

**Drei wichtige Funktionen:**

**Energieträger**

**Nucleotid**

**Phosphorylierung**



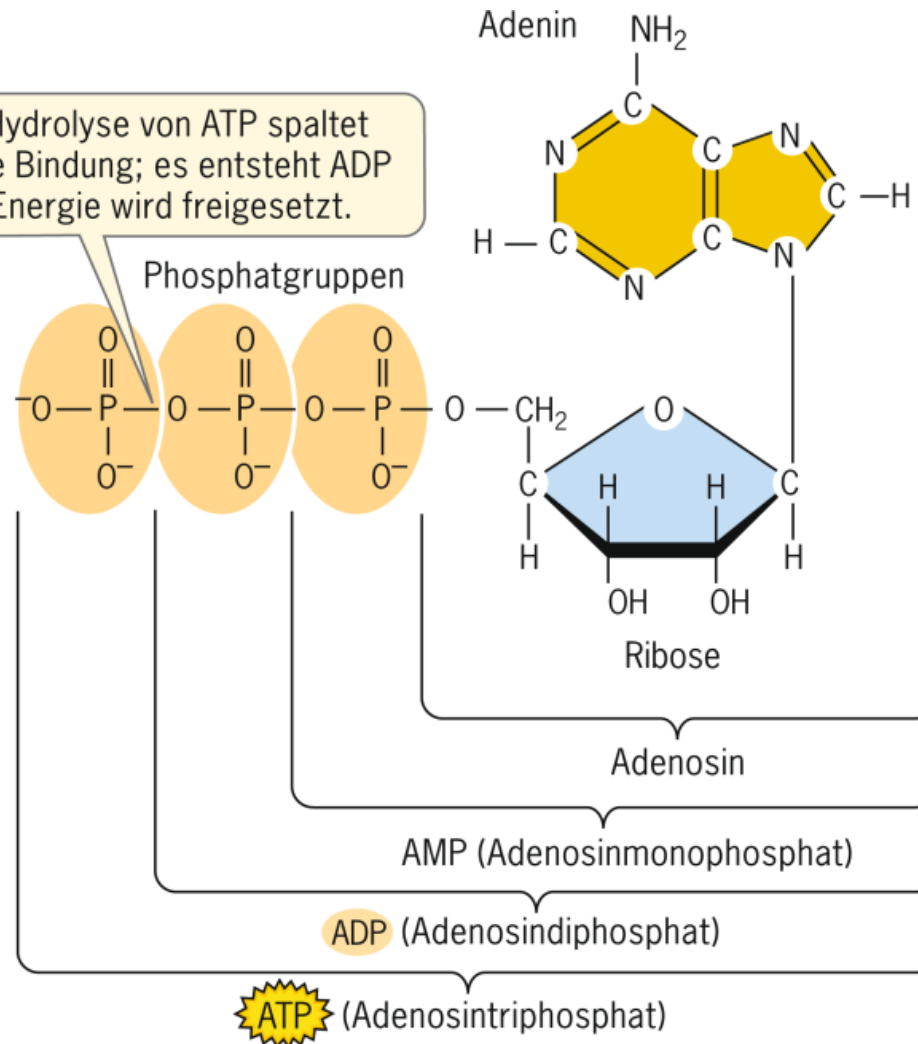
Videoverweis:

<http://www.br.de/telekolleg/faecher/biologie/biologie-6-nahrung104.html>

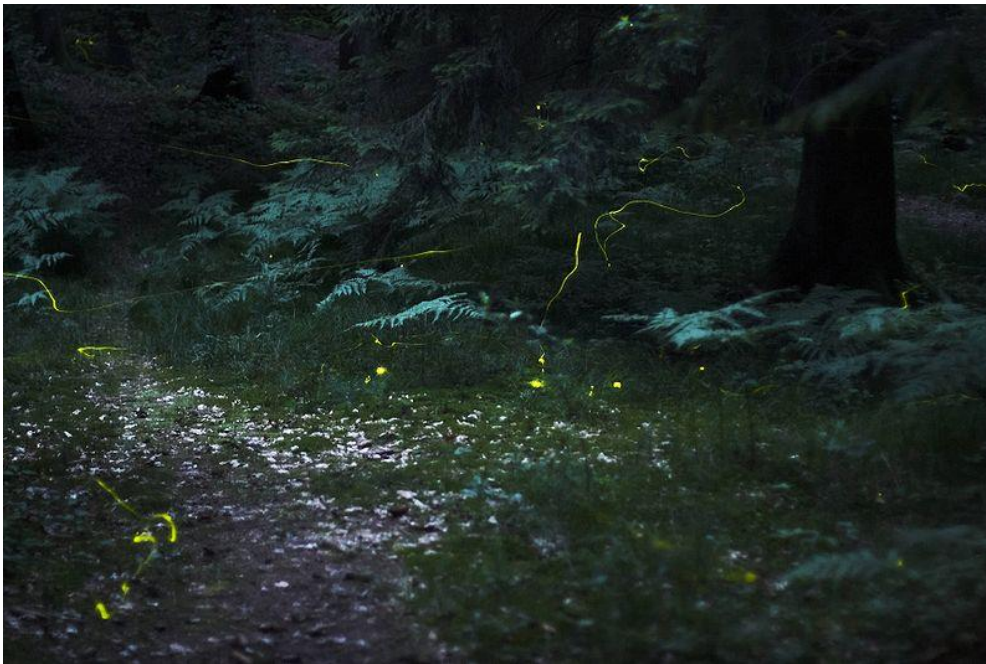
# Hydrolyse von ATP setzt Energie frei

a)

Die Hydrolyse von ATP spaltet diese Bindung; es entsteht ADP und Energie wird freigesetzt.



### Beispiel: Biolumineszenz

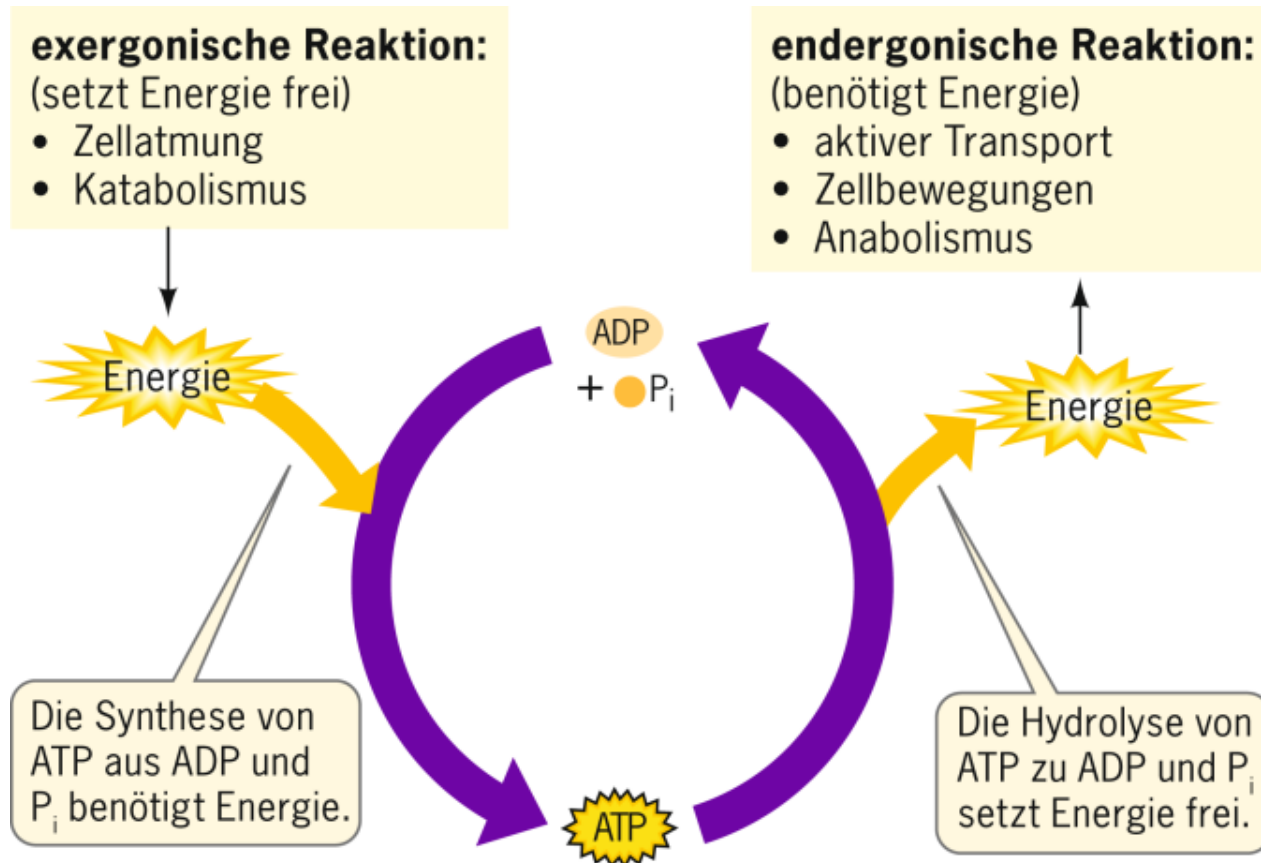


Weibchen des Großen Leuchtkäfers  
(*Lampyris noctiluca*)

Glühwürmchen in einem Wald bei Nürnberg, Belichtungszeit 30s.

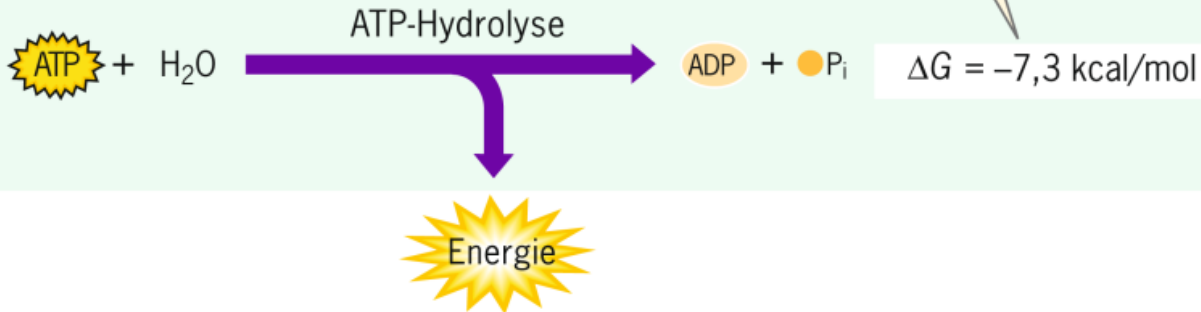


# ATP koppelt **exergonische** und **endergonische** Reaktionen

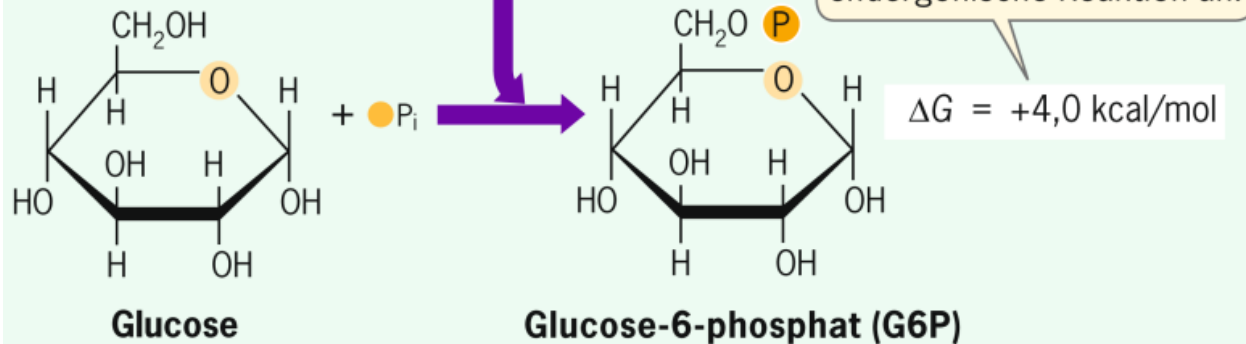


# ATP koppelt exergonische und endergonische Reaktionen

**exergonische Reaktion**  
(setzt Energie frei)



**endergonische Reaktion**  
(benötigt Energie)



Die gekoppelte Reaktion hat insgesamt ein negatives  $\Delta G$ ; dieses zeigt eine exergonische Reaktion an, die vollständig ablaufen wird.

**Netto  $\Delta G = -3,3 \text{ kcal/mol}$**

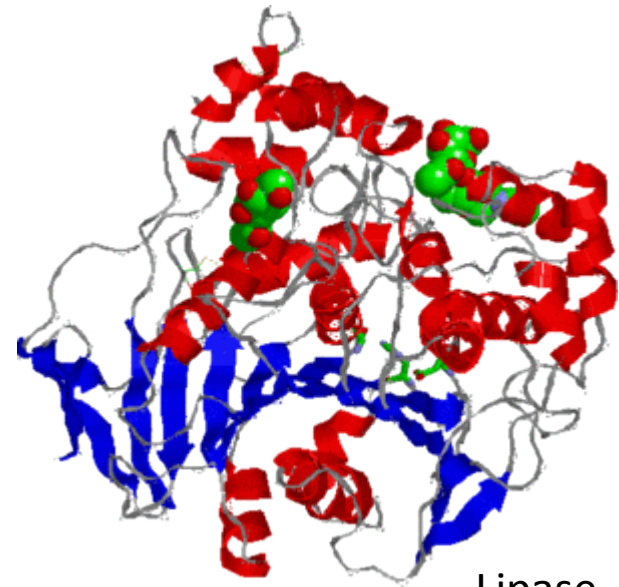
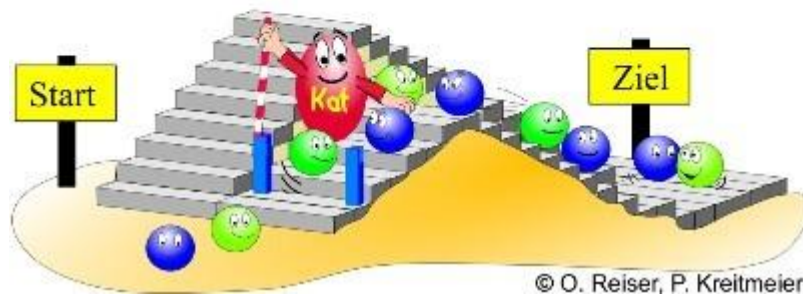
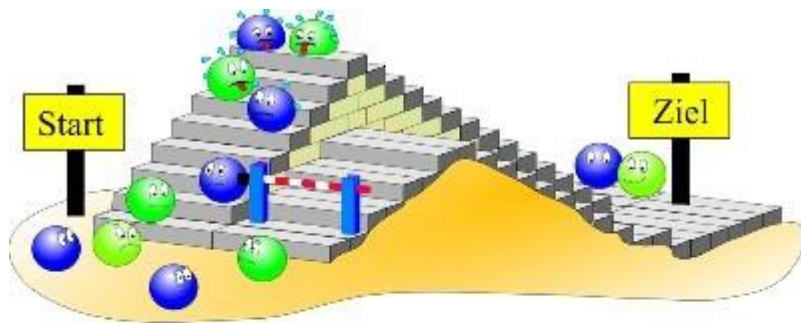
### 3 Was sind Enzyme?

Reaktionsgeschwindigkeit (Reaktionsrate)

Katalysatoren

Biokatalysatoren – Enzyme

触媒

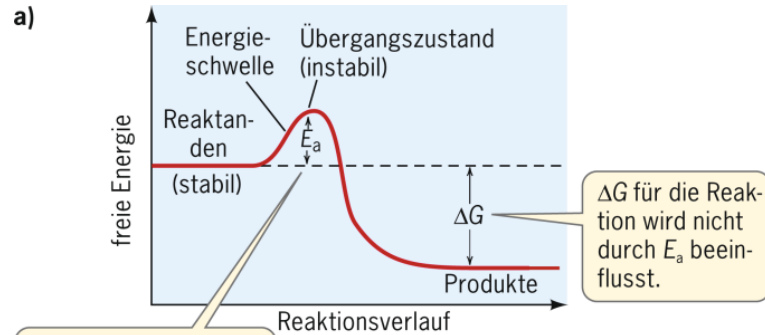


Lipase

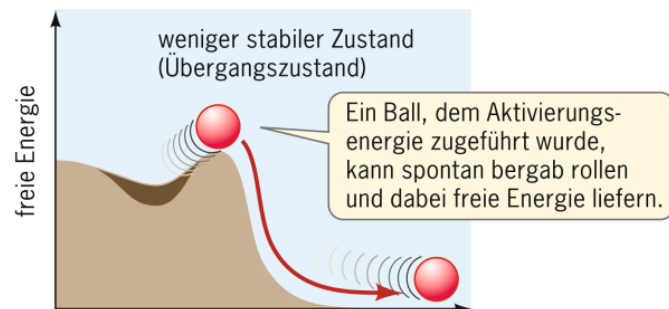
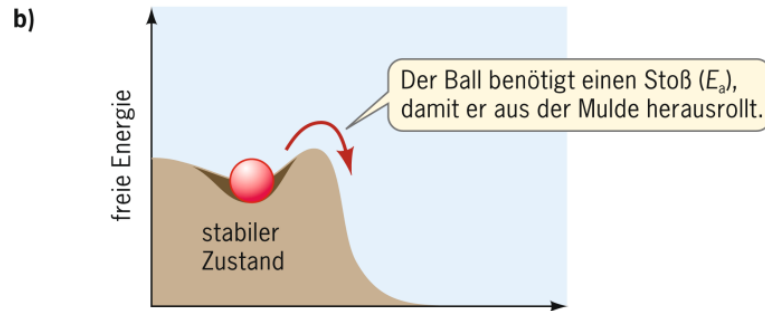
# Energieschwelle überwinden

3

Was sind Enzyme?



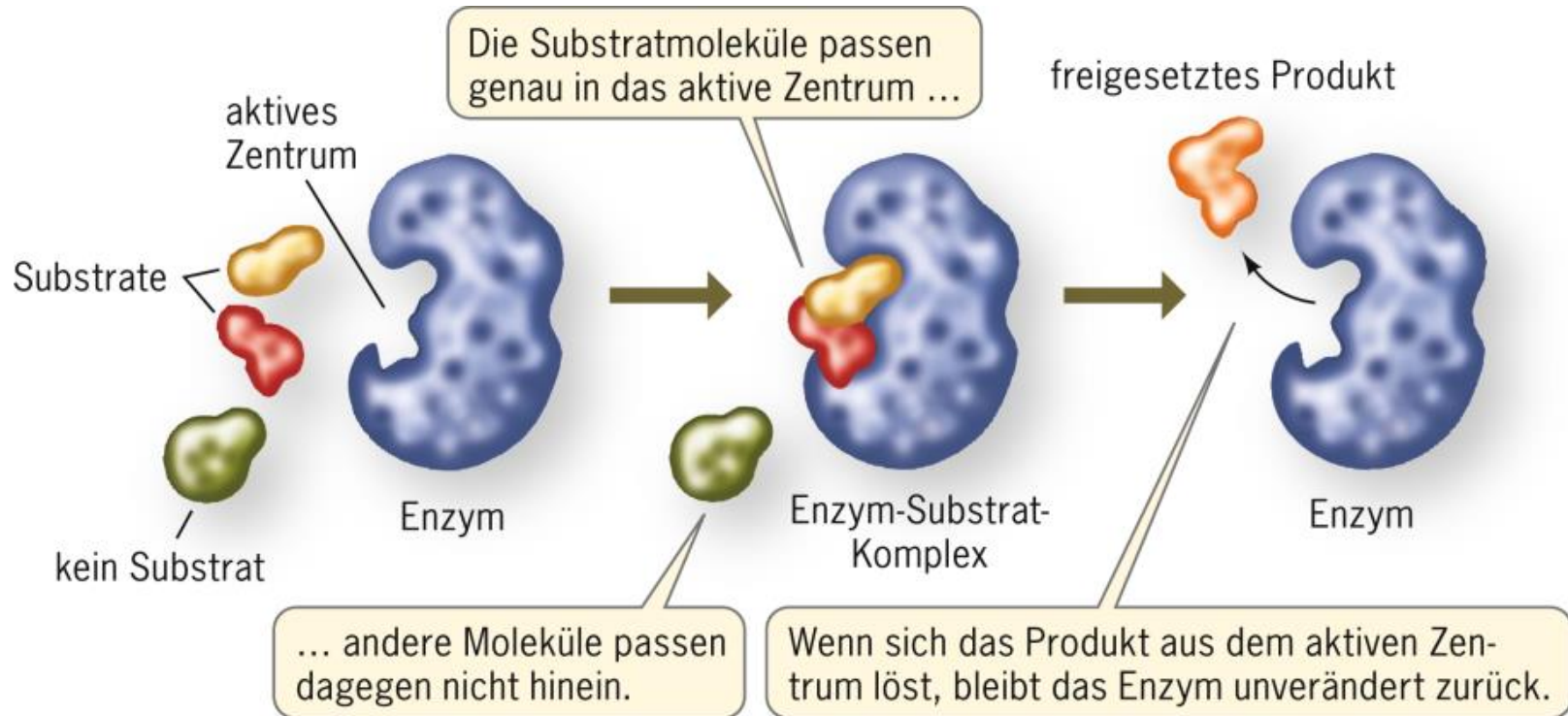
$E_a$  ist die Aktivierungsenergie, die für den Start einer Reaktion notwendig ist.



# Enzyme binden in ihrem aktiven Zentrum spezifisch Reaktanden

3

Was sind Enzyme?



Sind hochspezifisch,  
**substratspezifisch** und  
**reaktionsspezifisch**

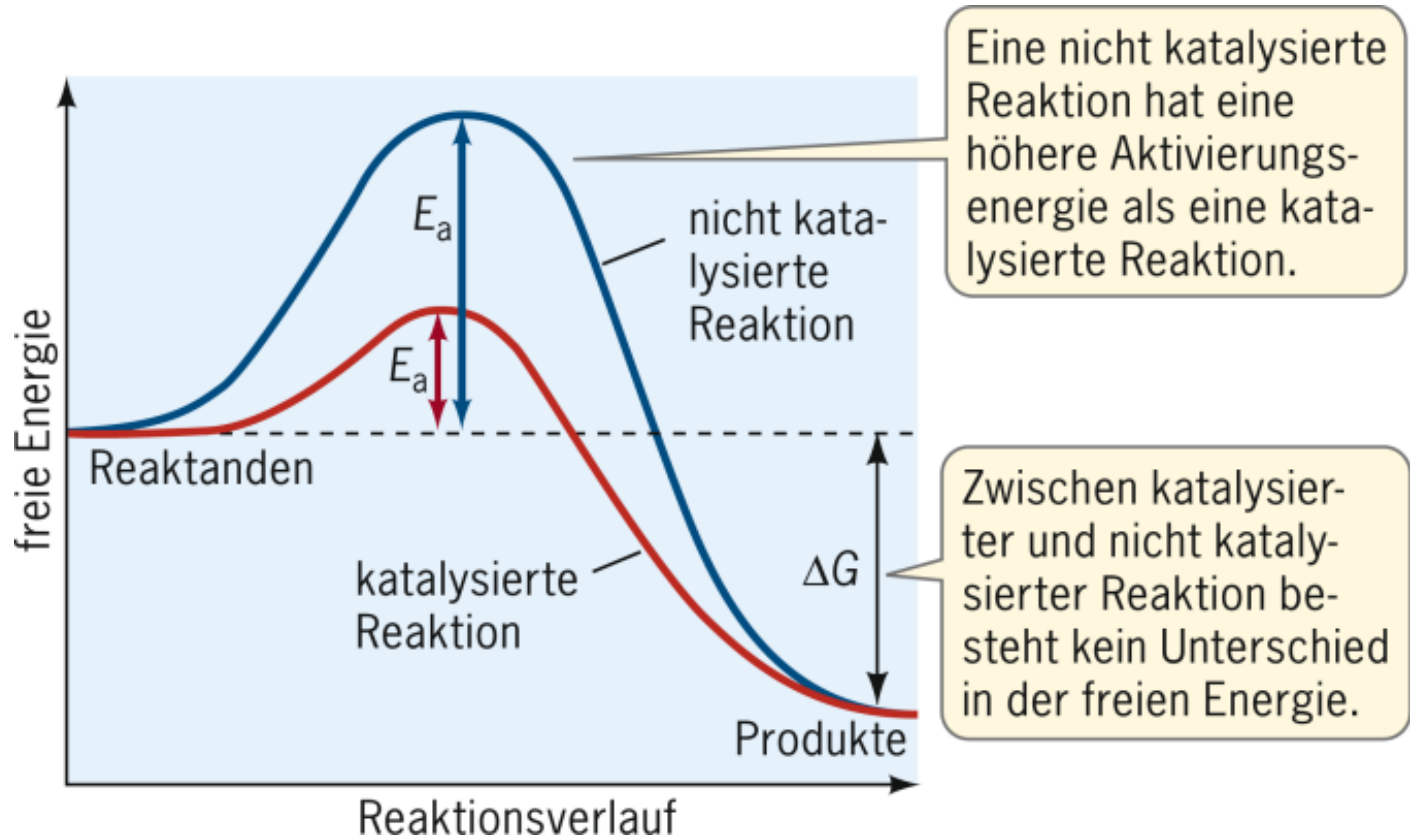
**Aktives Zentrum**  
**Enzym-Substrat-Komplex**



## Enzyme erniedrigen Energieschwelle....

3

Was sind Enzyme?



...beeinflussen aber **NICHT** das chemische Gleichgewicht



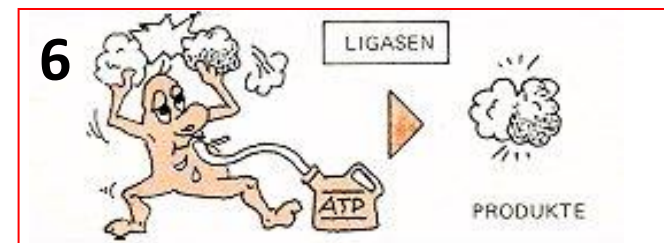
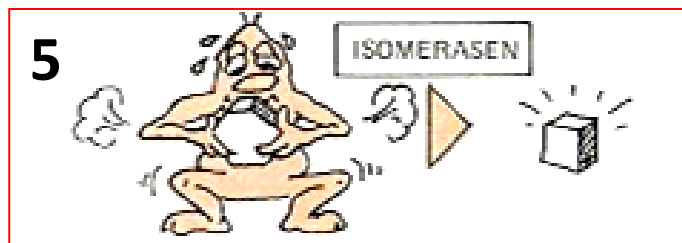
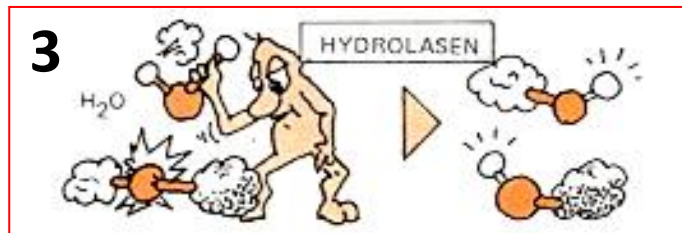
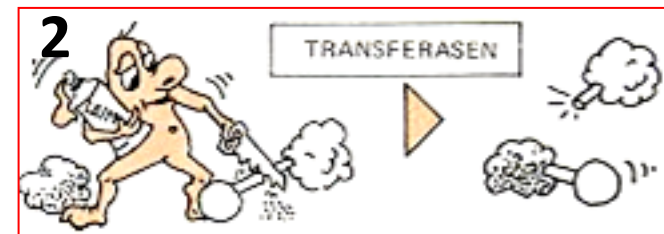
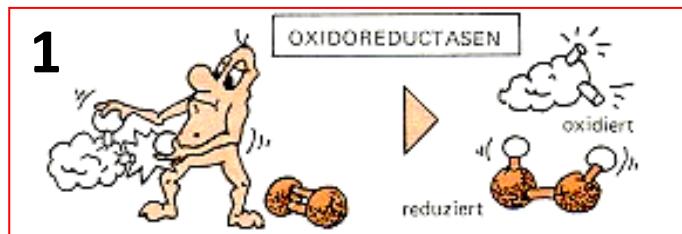
## 4 Wie funktionieren Enzyme?

Während und nach Bildung des Enzym-Substrat-Komplexes finden komplexe chemische Wechselwirkungen statt:

Spaltung alter Bindungen

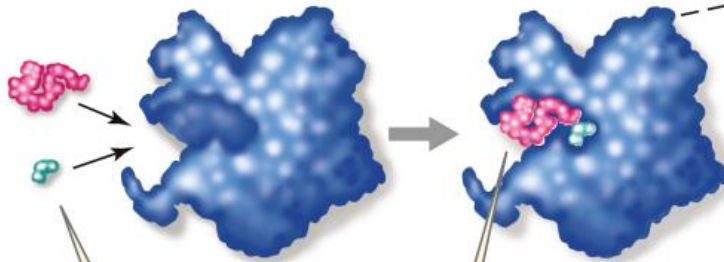
Bildung neuer Bindungen

### Enzymklassen

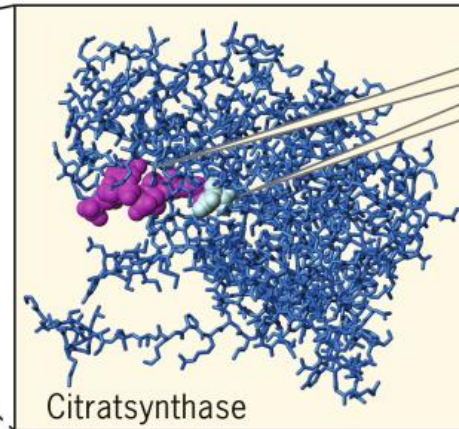


## Katalyse durch Annäherung

### a) räumliche Ausrichtung



Die beiden Substrate werden räumlich so ausgerichtet, dass sie reagieren können.



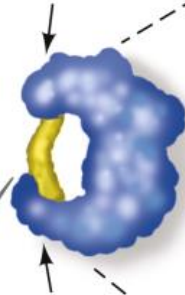
Zwei Substrate werden dicht nebeneinander im aktiven Zentrum des Enzyms Citratsynthase gebunden.

# Enzyme setzen Substrate unter Spannung

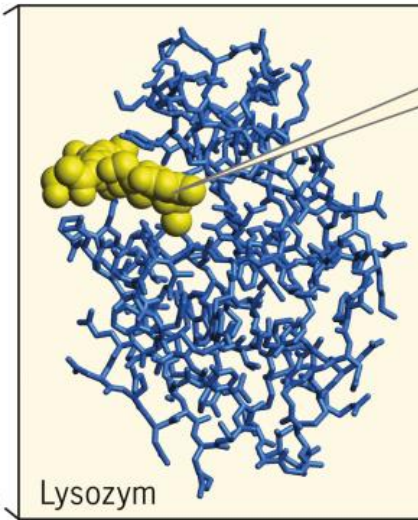
4

Wie funktionieren  
Enzyme?

## b) physikalische Spannung

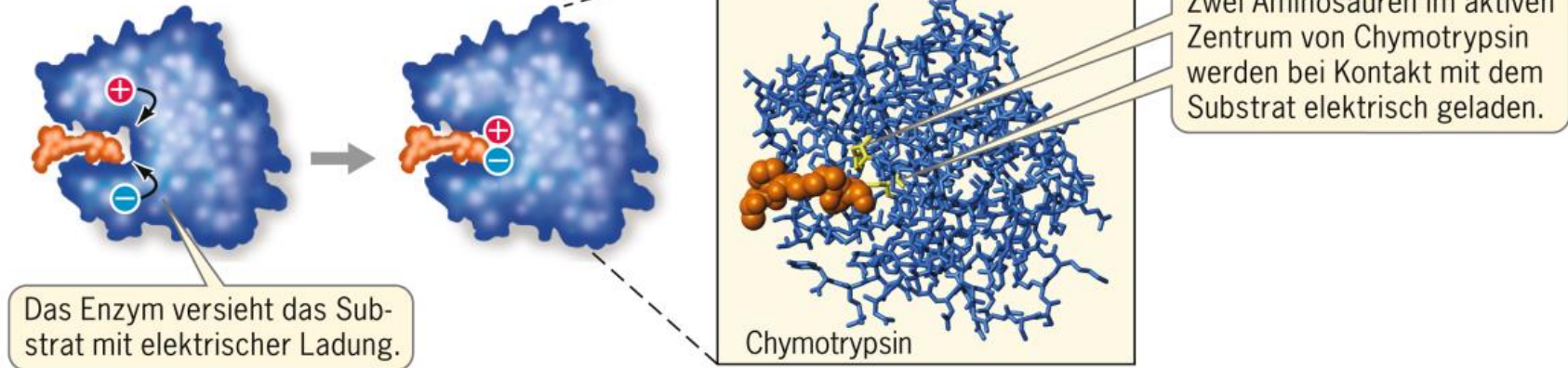


Das Enzym setzt das Substrat unter Spannung.



Das aktive Zentrum von Lysozym setzt das Polysaccharidsubstrat unter Spannung, sodass seine Struktur flacher wird.

## c) chemische Ladung



## Säure-Basen-Katalyse

Saure oder basische Seitenketten von AS im aktiven Zentrum übertragen  $H^+$  auf Substrate oder nehmen auf, dabei wird kovalente Bindung destabilisiert

## Kovalente Katalyse

Funktionelle Gruppe einer Seitenkette bildet eine zeitweilige kovalente Bindung mit einem Teil des Substrats

## Metallionen-Katalyse

Metallionen (Cu, Zn, Fe, Mn), fest an Seitenketten des Proteins gebunden, verlieren Elektronen oder nehmen sie auf, dadurch wichtige Teilnehmer an Redoxreaktionen

## Aktives Zentrum ist für Substrat spezifisch

Wasserstoffbrücken-Bindungen

Anziehung und Anstoßung elektrisch geladener Gruppen

Hydrophobe Wechselwirkungen

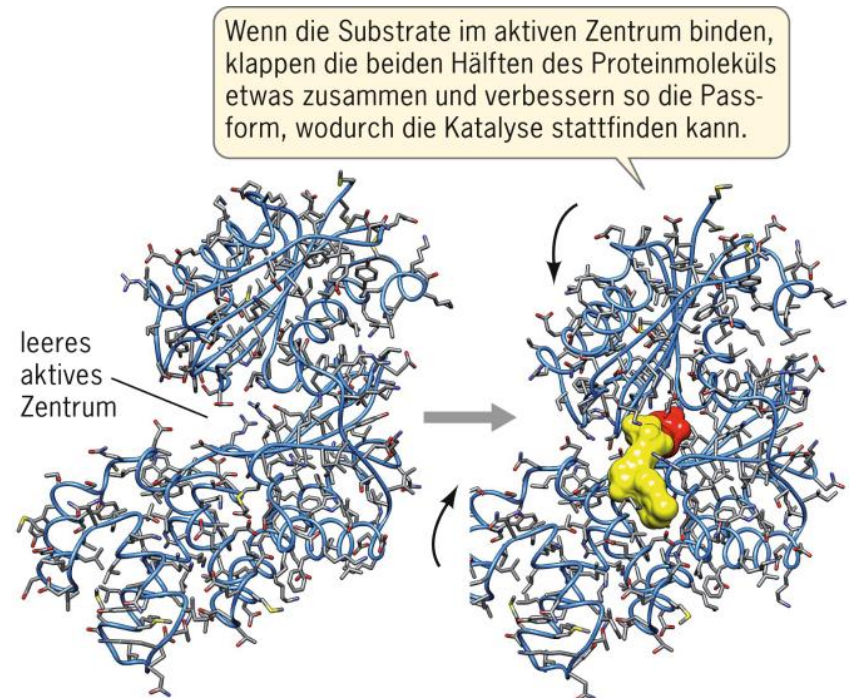
## Schlüssel-Schloss-Prinzip

## Enzym ändert seine Konformation, wenn es ein Substrat bindet

### *induced fit*

Aufgaben des übrigen Makromoleküls:

- Stabiler Rahmen, Ausrichtung des Substrates
- Kleine, aber wichtige Veränderungen der Struktur des aktiven Zentrums
- Bindungsstellen für regulatorische Moleküle





## Prosthetische Gruppen

Molekulare Gruppierungen (keine Aminosäuren), die dauerhaft an Enzym gebunden  
Bsp.: Häm, Flavin, Retinal

## Cofaktoren

Anorganische Ionen wie Kupfer, Zink, Eisen, die an bestimmte Enzyme gebunden und für Funktion essentiell

Bsp.:  $\text{Fe}^{2+}$  oder  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^+$  oder  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$

## Coenzyme

Organische Moleküle, die für Aktivität eine oder mehrerer Enzyme benötigt

Sind im Vergleich zum Enzym relativ klein

Bewegen sich von Enzymmolekül zu Enzymmolekül

Addieren oder entfernen chemische Gruppen

Binden an aktives Zentrum

Bsp.: Biotin, CoA,  $\text{NAD}^+/\text{NADH}+\text{H}^+$ ,  
 $\text{FAD}/\text{FADH}_2$ ,  $\text{ATP}/\text{ADP} + \text{P}_i$

**VITAMINE !**

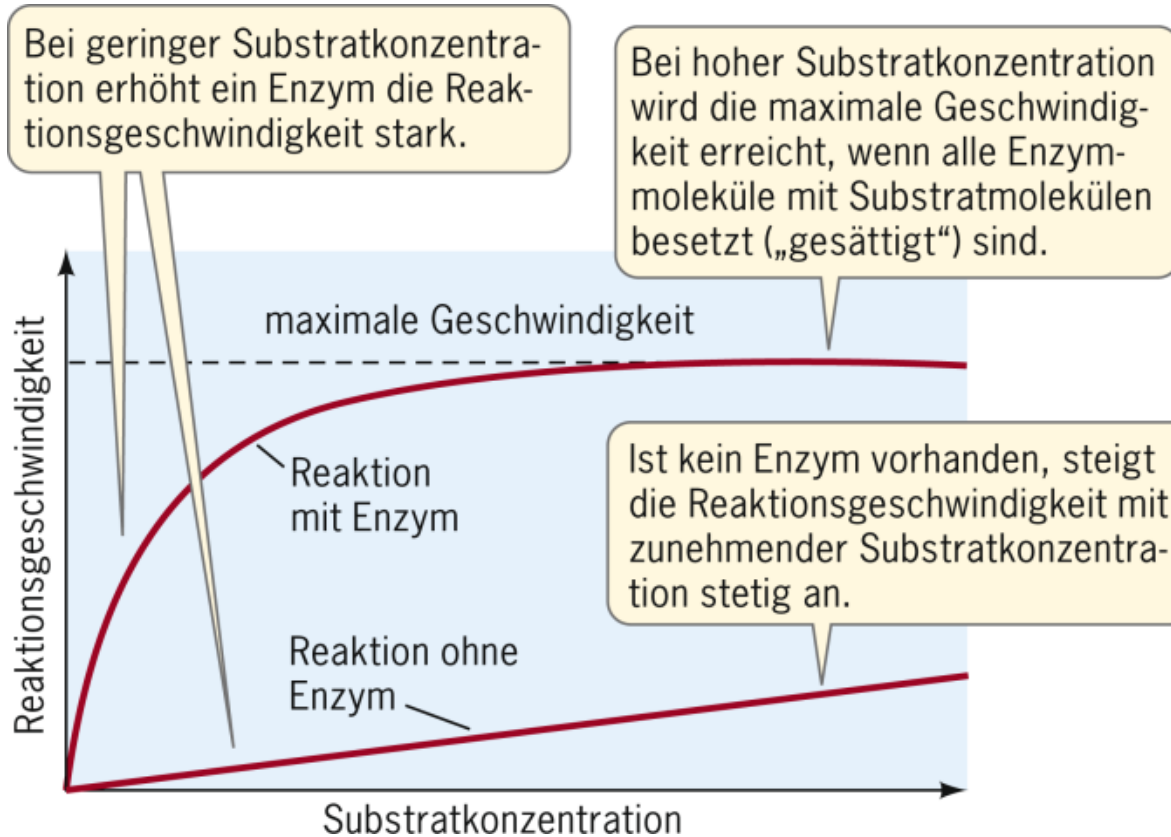




# Substratkonzentration beeinflusst Reaktionsgeschwindigkeit

4

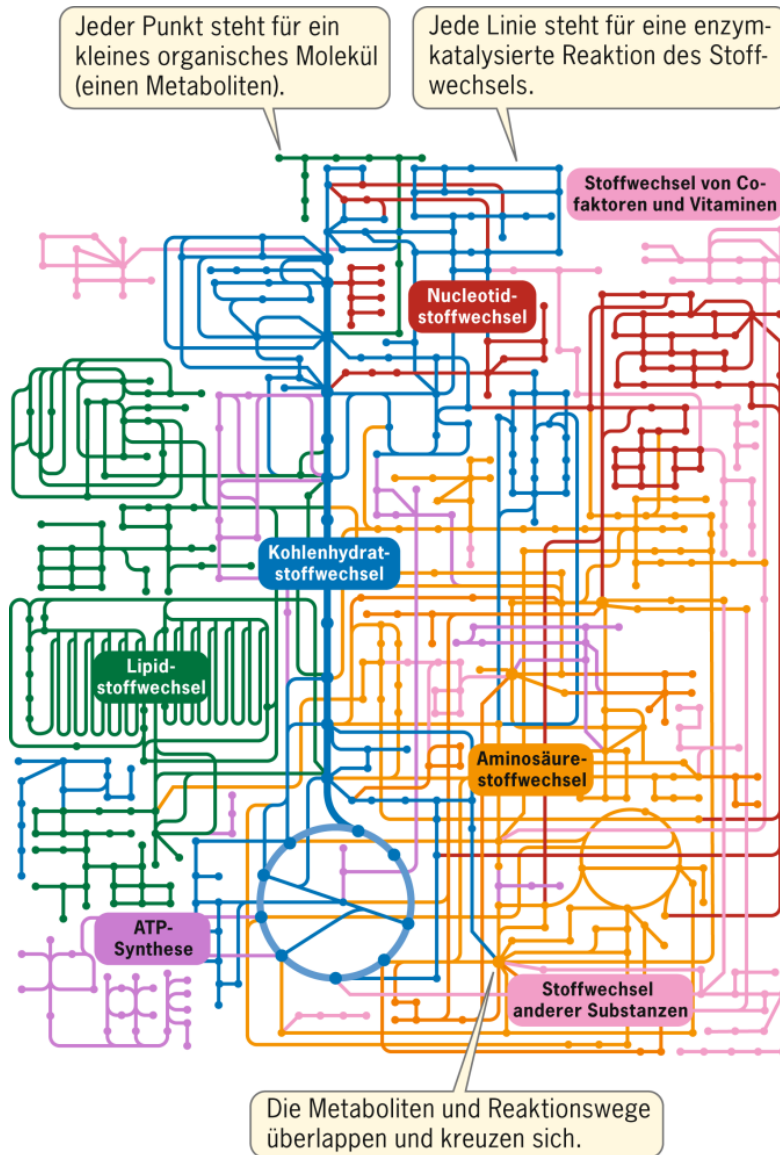
Wie funktionieren Enzyme?



## Sättigung

**Wechselzahlen:** wie viele Substratmoleküle werden von einem aktiven Zentrum pro Zeit umgesetzt unter Substratüberschuss

## 5 Wie wird Enzymaktivität reguliert?



### Homöostase

Regulation der Genexpression

Signaltransduktionswege

enzymkodierende Gene

Aktivierung oder Inaktivierung von Enzymen

bestimmte Enzyme sind Schlüsselstellen für Regulation ganzer Kaskaden

Regulation der Geschwindigkeit

Neues Gebiet: Systembiologie

# Enzymaktivität wird durch Inhibitoren reguliert

## Inhibitoren

endogene und exogene Hemmstoffe

## Irreversible Hemmung

Binden an bestimmte Seiten im aktiven Zentrum und inaktivieren dauerhaft

Bsp. Sarin  
Malathion

# MASSACRE BY POISON GAS

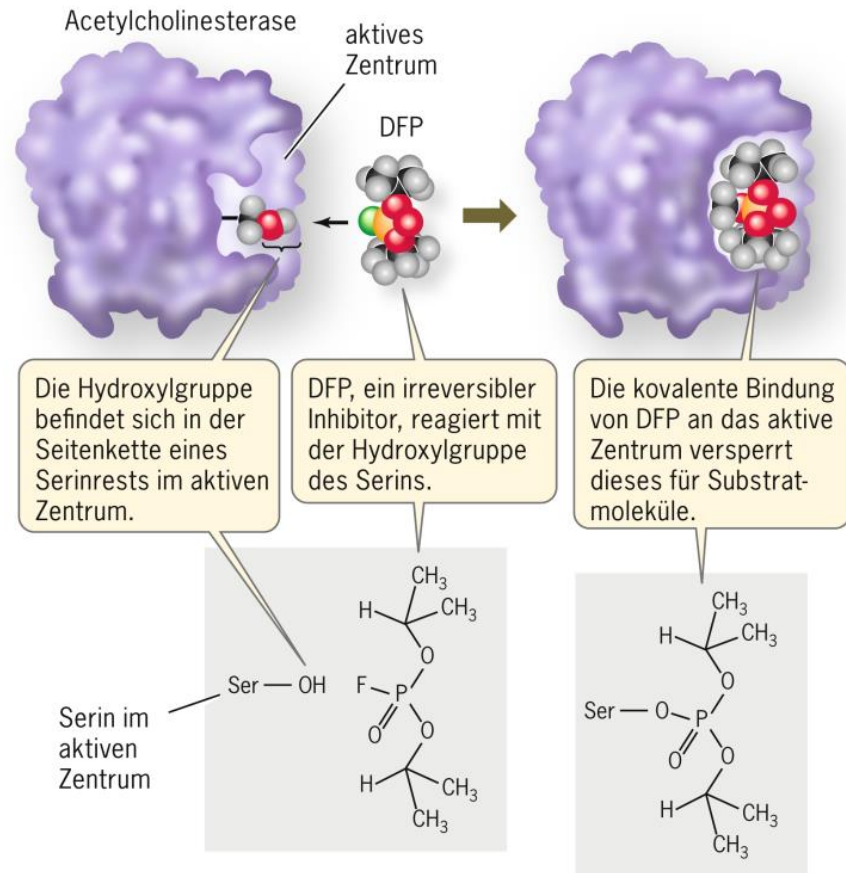


Many die, 1,200 collapse in Tokyo Tube attack

SIX people died today and more than 1,200 people suffered convulsions as clouds of toxic nerve gas swept through Tokyo's rush-hour subway system.

The city's emergency services and hospitals scrambled to handle the crisis as all the stations closed. In the days since, the government has announced the attack is "unprecedented."

Continued on Page 2 Col 4



## Reversible Hemmung

### Kompetitive Hemmung:

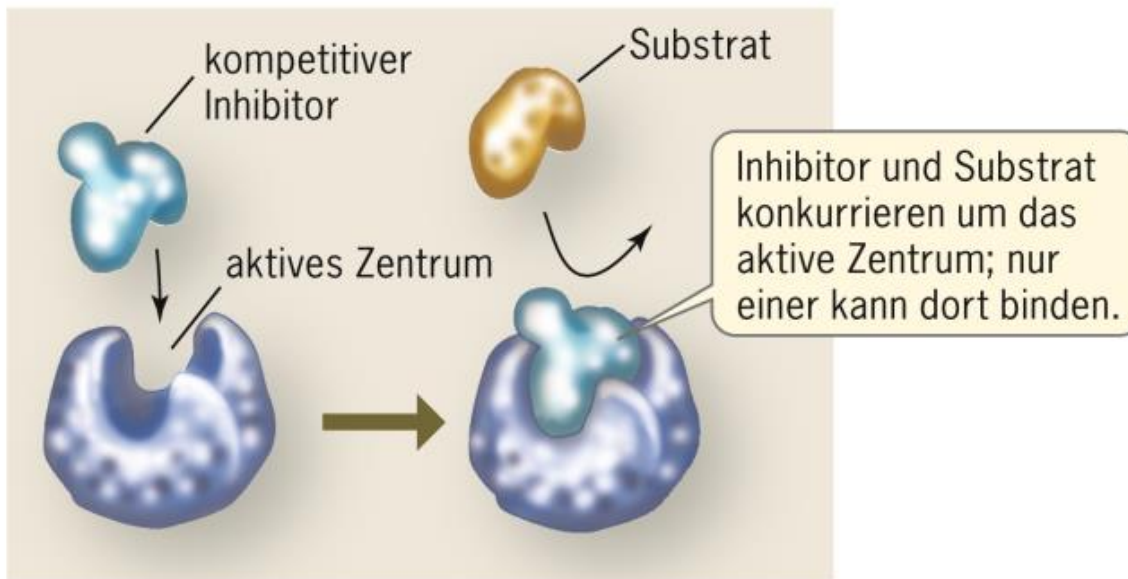
Inhibitor bindet nicht-kovalent am aktiven Zentrum, wird aber nicht umgesetzt

Reversibel

Konkurriert mit Substrat

Sinkt Konzentration des Inhibitors, löst er sich aus aktiven Zentrum

#### a) kompetitive Hemmung



## Reversible Hemmung

### Nicht-kompetitive Hemmung:

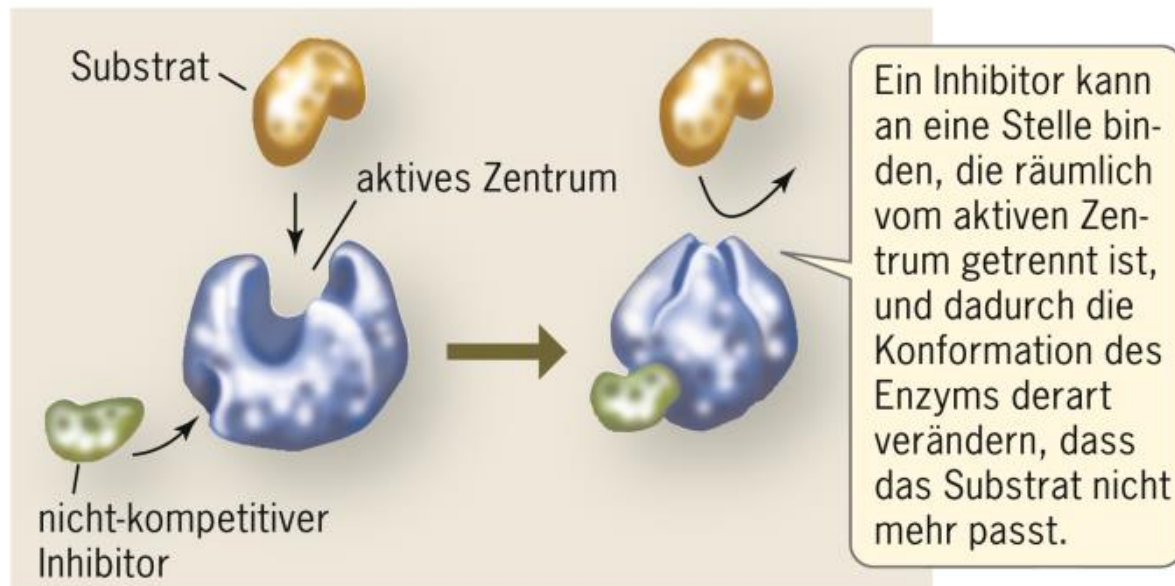
Inhibitor bindet an Bereich, der räumlich getrennt vom aktiven Zentrum

Kann Konformationsänderung auslösen

Entweder keine Substratbindung mehr möglich oder Geschwindigkeit der Produktbildung wird verringert

Reversibel

### b) nicht-kompetitive Hemmung



## Allosterische Regulation

**Allosterischer Effektor** bindet in Bereich, der nicht das aktive Zentrum ist, dadurch wird Konformationsänderung induziert

Änderung der Raumstruktur verändert Affinität des aktiven Zentrums für Substrat, so dass sich Reaktionsgeschwindigkeit ändert

allosterischer Effektor bindet an **allosterisches Zentrum** hochspezifisch

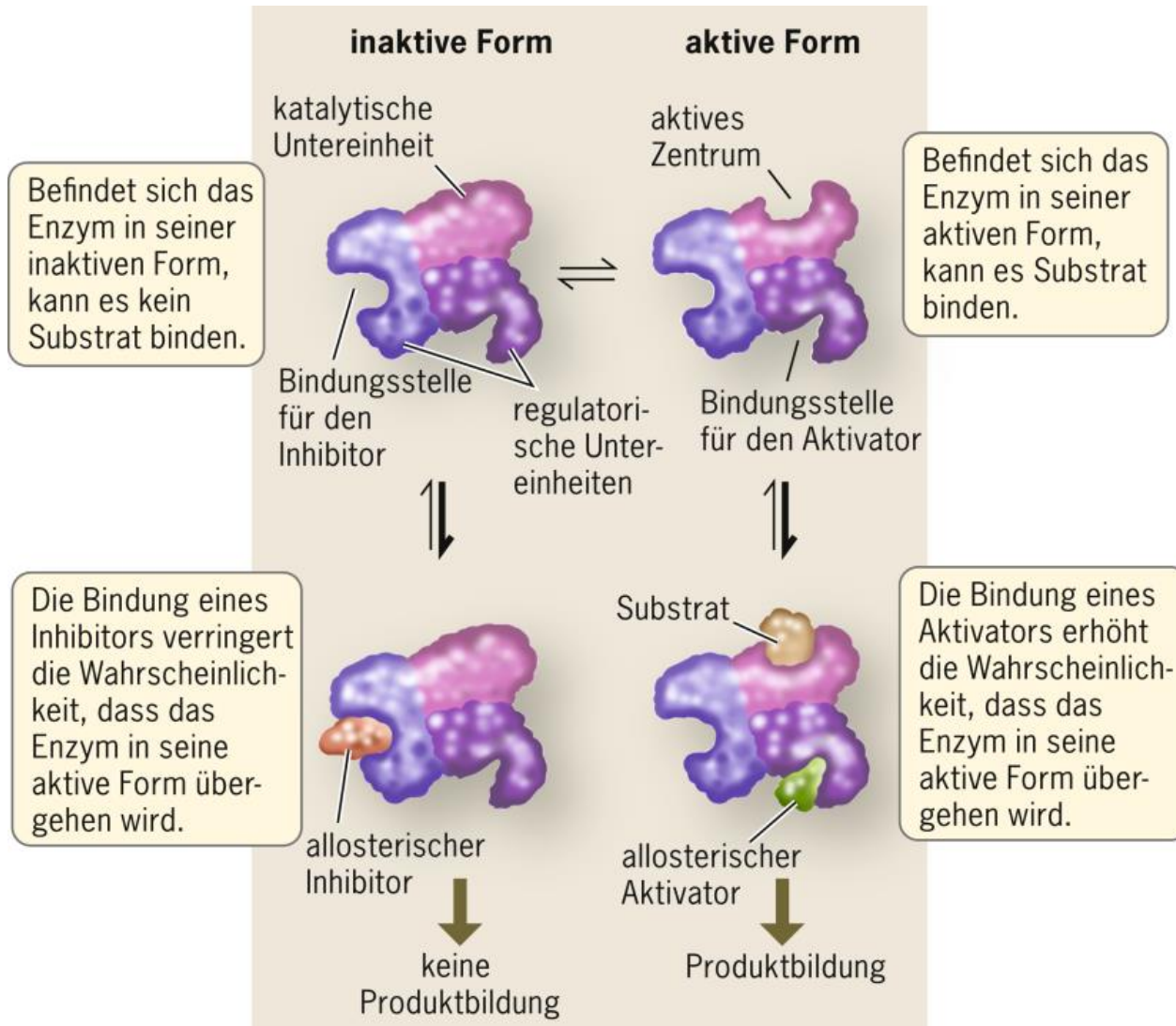
allosterische Zentren häufig an anderen Untereinheiten – **regulatorische Untereinheit** (aktives Zentrum an **katalytischer Untereinheit**)

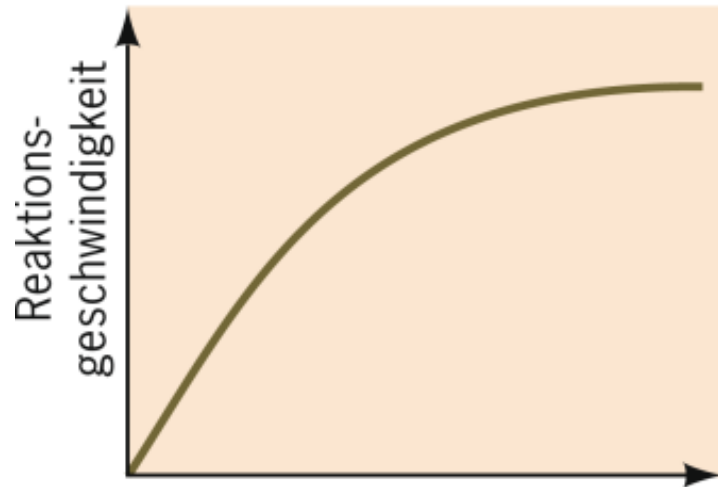
Phänomen der Zusammenarbeit aktiver Zentren innerhalb eines Proteins bezeichnet man als **Kooperativität** (Bsp. Hämoglobin)



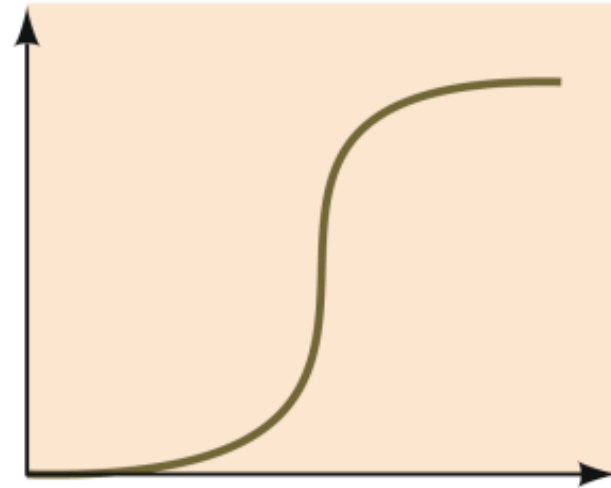
5 Wie wird Enzymaktivität reguliert?

# Allosterische Enzyme kontrollieren durch Veränderung der Konformation

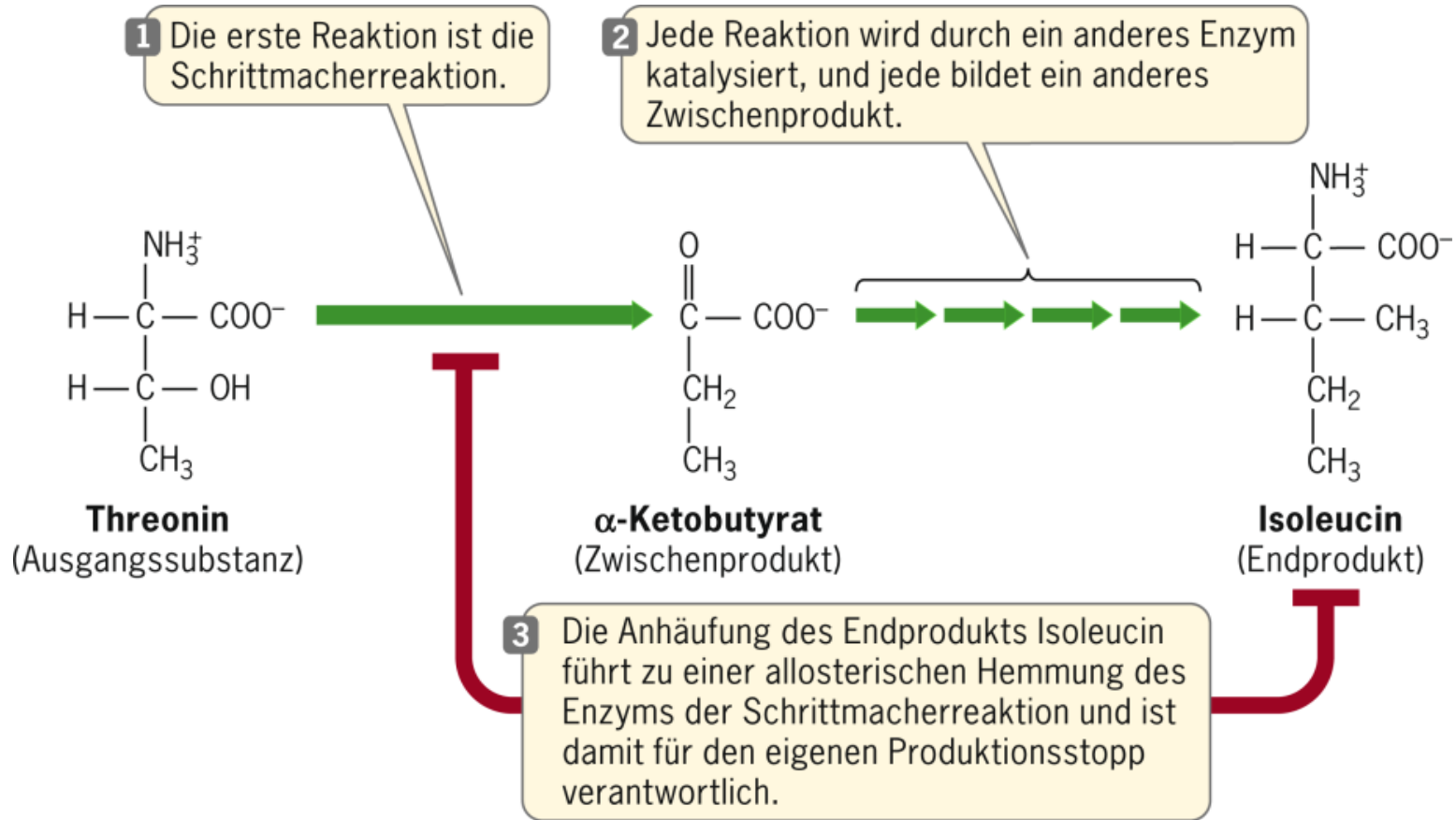


**a) nicht-allosterische Enzyme**

Substratkonzentration

**hyperbolisch****b) allosterische Enzyme****sigmoid**

# Allosterische Effekte regulieren den Stoffwechsel



Schrittmacherreaktion ....Feedback-Hemmung bzw. Endpunkthemmung

5

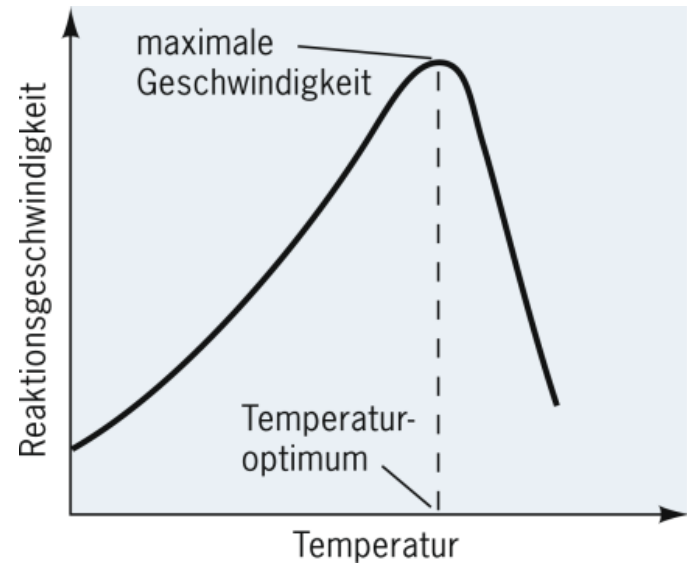
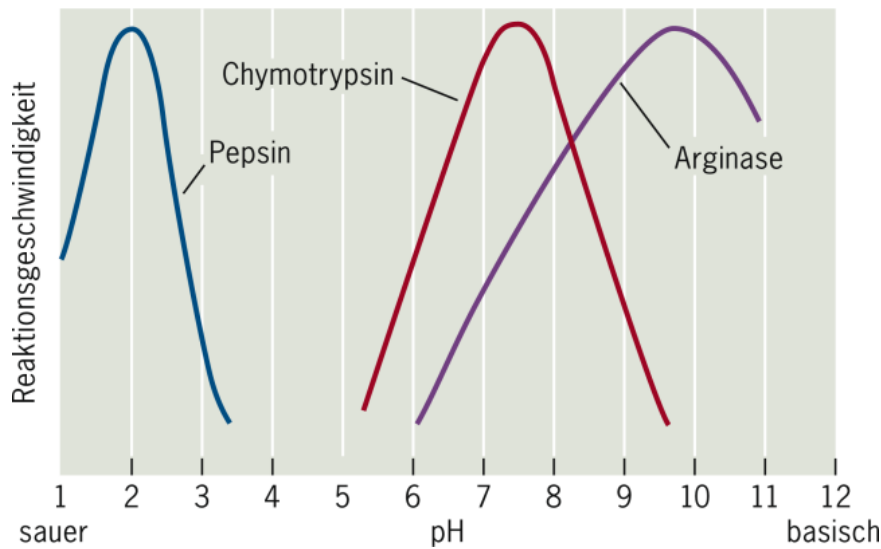
Wie wird  
Enzymaktivität  
reguliert?

## Enzyme werden durch ihre Umgebung beeinflusst

pH-Optimum

Temperatur-Optimum

Akklimatisation aufgrund von Isoenzymen





# Stoffwechsel-Übersicht

Nukleinsäuren

Zuckerstoffwechsel

## Stoffwechselwege zur Gewinnung chemischer Energie

$\beta$ -Oxidation

Harnstoffzyklus

Aminosäurenstoffwechsel

Hormonstoffwechsel



# 1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

---

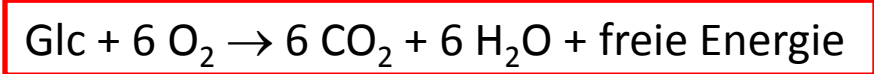
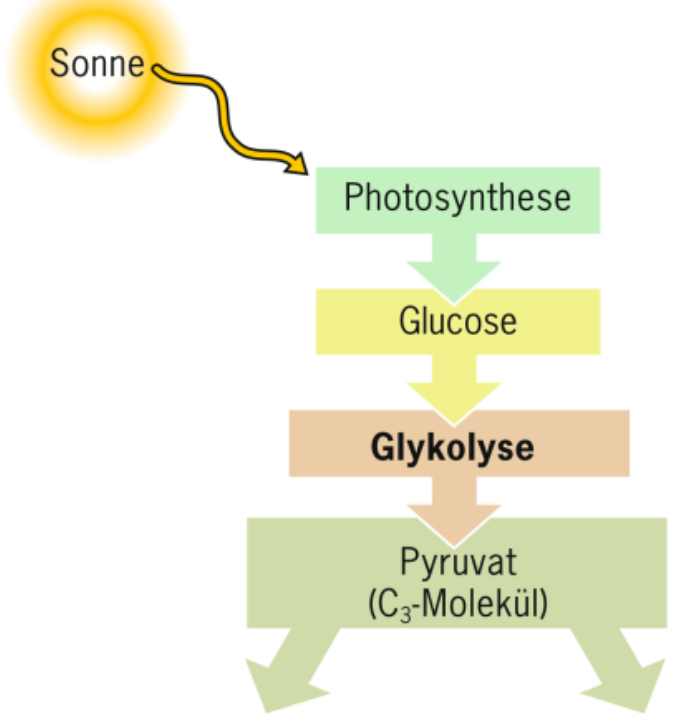
## Stoffwechselwege (SW) werden von 5 Grundsätzen bestimmt:

1. Komplexe chemische Umwandlungen finden nicht in einer einzigen Reaktion statt, sondern in einer Reihe von getrennten Reaktionen, die zusammen den SW-Weg bilden.
2. Jede Reaktion eines SW-Weges wird durch ein Enzym katalysiert.
3. SW-Wege sind in allen Organismen prinzipiell ähnlich.
4. In eukaryontischen Zellen sind viele SW-Wege kompartimentiert.
5. Jeder SW-Weg wird durch die Aktivität von Schlüsselenzymen reguliert. Enzyme können aktiviert oder inhibiert werden, was ihre Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst.



1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

# Während des Glucoseabbaus speichern Zellen freie Energie



Reaktionen sind  
**isotherm**  
**isobar**

Energie steckt in den kovalenten Bindungen der Glucose



**aerob**  
**(O<sub>2</sub> vorhanden)**

**Zellatmung**

- vollständige Oxidation
- Abfallprodukte: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>
- Nettoenergiegewinn pro Glucosemolekül: 32 **ATP**

oder

**anaerob**  
**(O<sub>2</sub> nicht vorhanden)**

**Gärung**

- unvollständige Oxidation
- Abfallprodukte: Milchsäure oder Ethanol und CO<sub>2</sub>
- Nettoenergiegewinn pro Glucosemolekül: 2 **ATP**

1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

## Während des Glucoseabbaus speichern Zellen freie Energie

Drei metabolische Prozesse spielen eine Rolle

### Glycolyse:

Abfolge chemischen Umwandlungen  
Aus 1 Glucose werden 2 Pyruvat  
Anaerob, braucht keinen  $O_2$

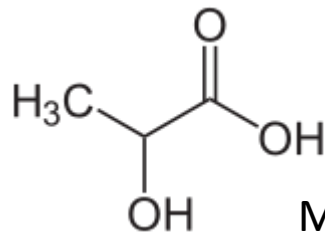
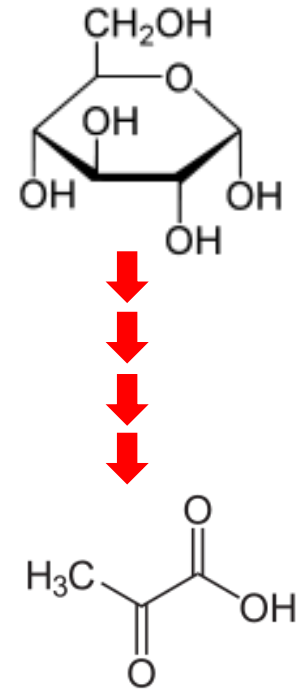
### Zellatmung:

verbraucht  $O_2$  aus der Umgebung, aerob  
jedes Pyruvat zu 3  $CO_2$   
über Abfolge von SW-Wegen – **Pyruvatoxidation**  
**Citratcyclus**  
**Atmungskette**

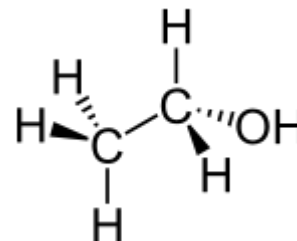
Großteil der Energie wird in ATP fixiert

### Gärung:

benötigt keinen  $O_2$ , anaerob  
Pyruvat in Milchsäure oder Ethanol  
Produkte noch relativ energiereich, daher weniger Energie freigesetzt



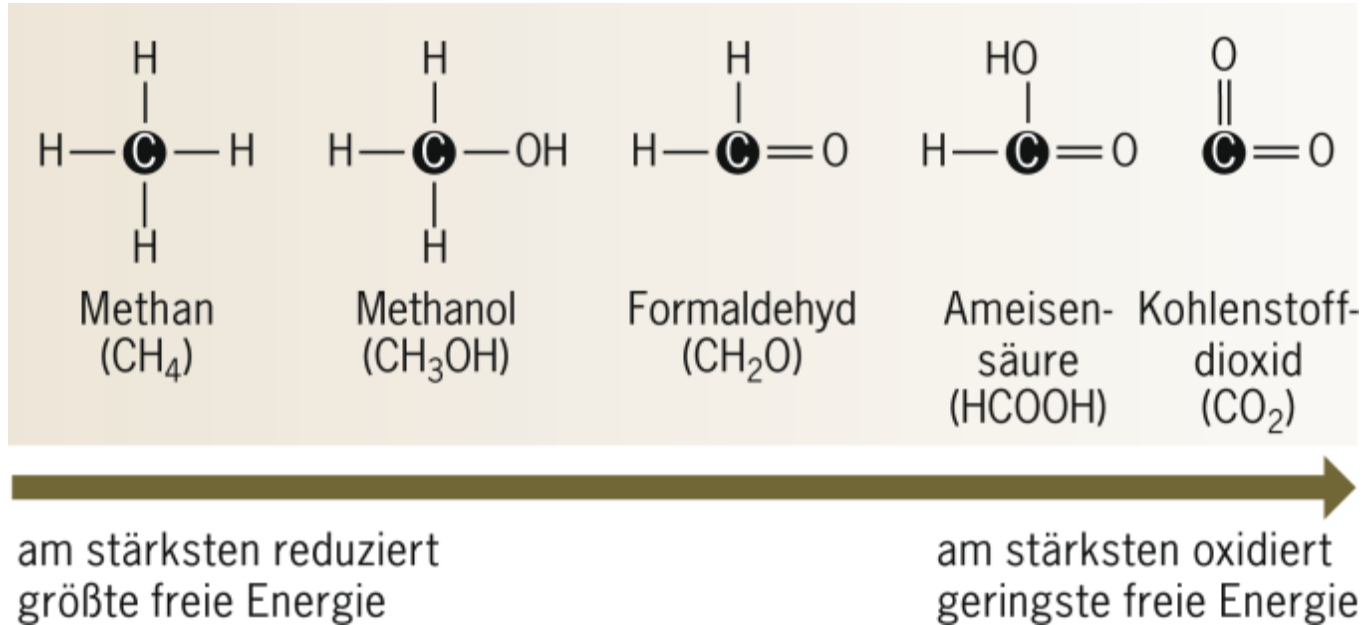
Milchsäure



Ethanol

1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

## Redoxreaktionen übertragen Elektronen und Energie



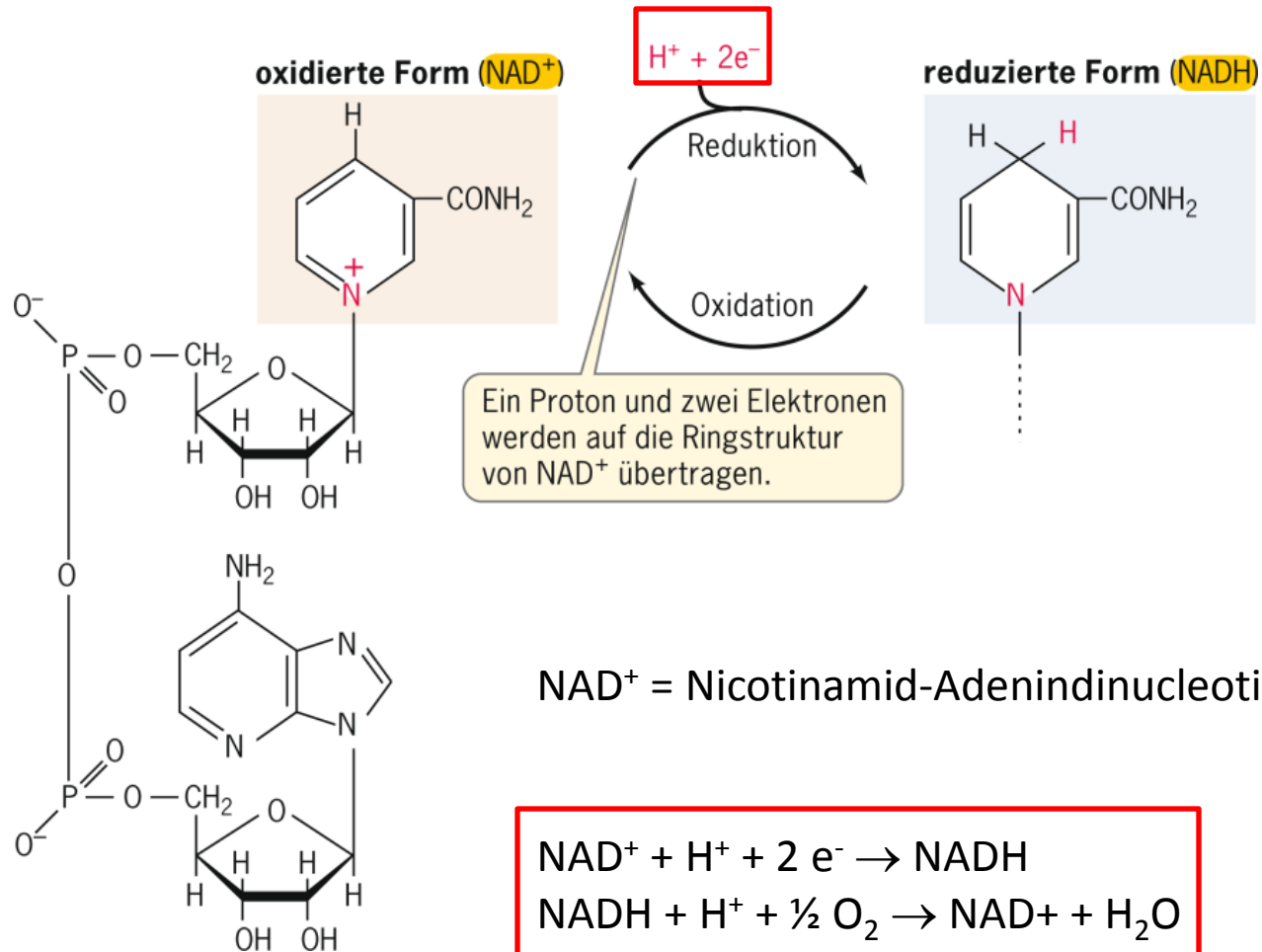
### Elektronentransfer

**Redoxreaktionen**      Reduktion: Aufnahme von Elektronen  
Oxidation: Abgabe von Elektronen

**Redoxpaar**      **Oxidationsmittel:** wird reduziert, Elektronenakzeptor, O<sub>2</sub>  
**Reduktionsmittel:** wird oxidiert, Elektronendonator, Glucose

1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

# NAD<sup>+</sup> spielt Schlüsselrolle bei der e<sup>-</sup>-Übertragung in Redoxreaktionen

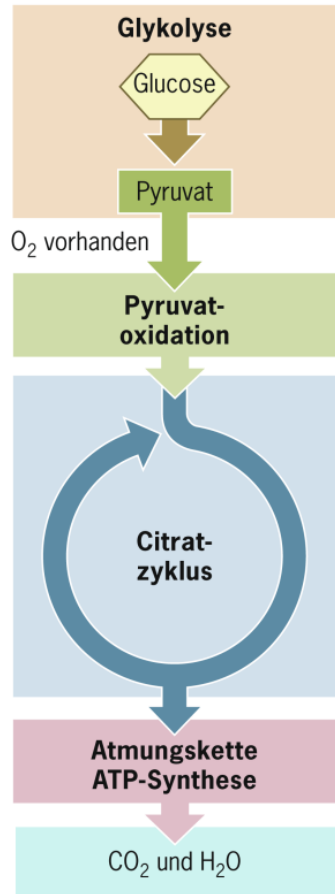


Weiteres Beispiel: FAD/FADH<sub>2</sub>

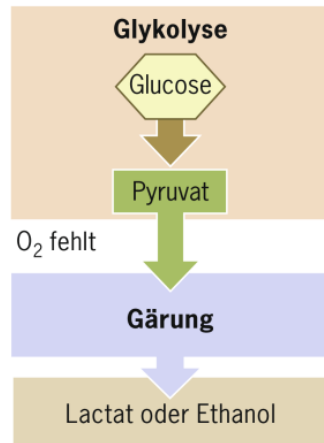
1 Wie wird bei Oxidation von Glucose Energie freigesetzt?

# Freisetzung von Energie aus Glucose im Überblick

a) Glykolyse und Zellatmung



b) Glykolyse und Gärung



Fünf SW-Wege laufen an unterschiedlichen Orten der Zelle ab:

## Eucaryonten

Cytosol  
Glykolyse  
Gärung

Innere Mito-Membran  
Pyruvatoxidation  
Atmungskette

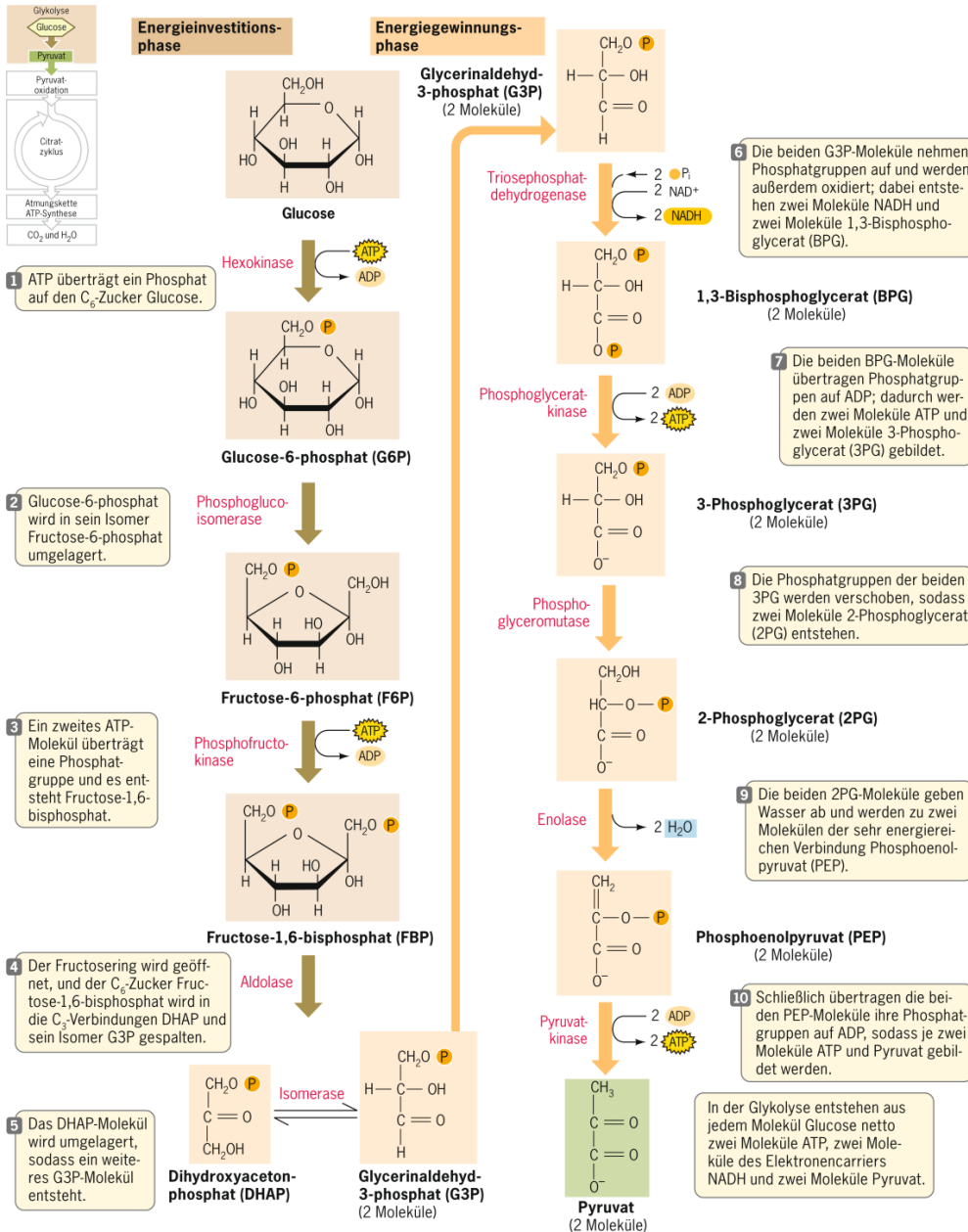
Mito-Matrix  
Citratcyclus

## Procaryonten

Cytoplasma  
Glykolyse  
Gärung  
Citratcyclus

Plasmamembran  
Pyruvatoxidation  
Atmungskette

## 2 Welches sind die aeroben SW-Wege des Glucoseabbaus ?



Nach 10 enzymkatalysierten Reaktionen:

**2 Pyr**  
**2 ATP**  
**2 NADH**

Zwei Abschnitte:  
**Energieinvestitionsphase**  
**Energiegewinnungsphase**



2

Welches sind die  
aeroben SW-Wege  
des Glucoseabbaus ?

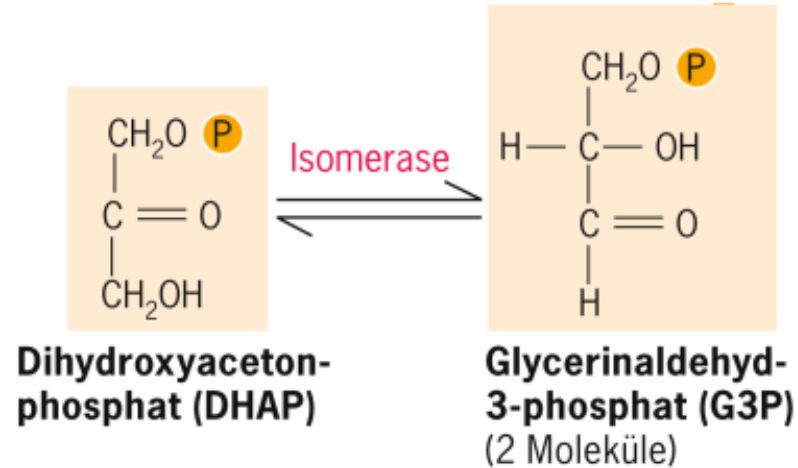
## Energieinvestitionsphase: Reaktionen 1 bis 5 benötigen ATP

Nach 5 Reaktionen:

Es wurden 2 Moleküle ATP investiert.

Glucose-Molekül wurde in zwei Moleküle eines Zuckerphosphats  
umgewandelt

5 Das DHAP-Molekül  
wird umgelagert,  
sodass ein weite-  
res G3P-Molekül  
entsteht.



Pro Glucose-Molekül wird folgende Phase zweimal durchlaufen

Umwandlung von G3P liefert NADH und ATP

Übertragung von Phosphatgruppen von Spendermolekülen auf ADP

### Substratkettenphosphorylierung

(Unterschied dazu: **oxidative Phosphorylierung**, in Atmungskette durch **ATP-Synthase**)

Zusammenfassung bis hier:

Energieinvestitionsphase verbraucht 2 ATP

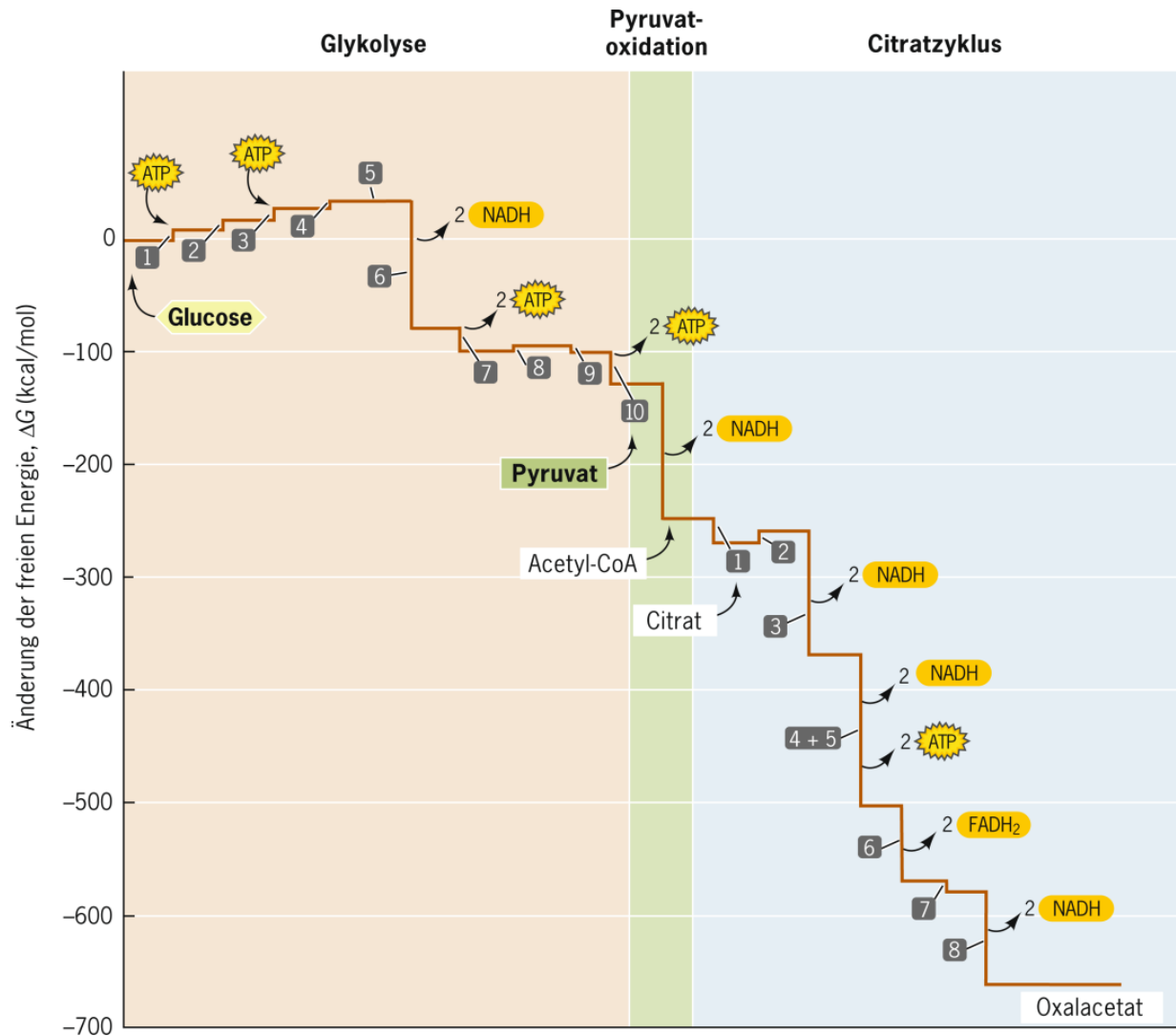
Energiegewinnungsphase liefert 4 ATP = 2 ATP netto

liefert ebenso 2 NADH

2

Welches sind die  
aeroben SW-Wege  
des Glucoseabbaus ?

## Pyruvatoxidation verbindet Glykolyse und Citratcyclus



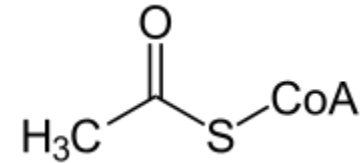
Jedes Glucosemolekül  
liefert:  
6 CO<sub>2</sub>  
10 NADH  
2 FADH<sub>2</sub>  
4 ATP

2

Welches sind die  
aeroben SW-Wege  
des Glucoseabbaus ?

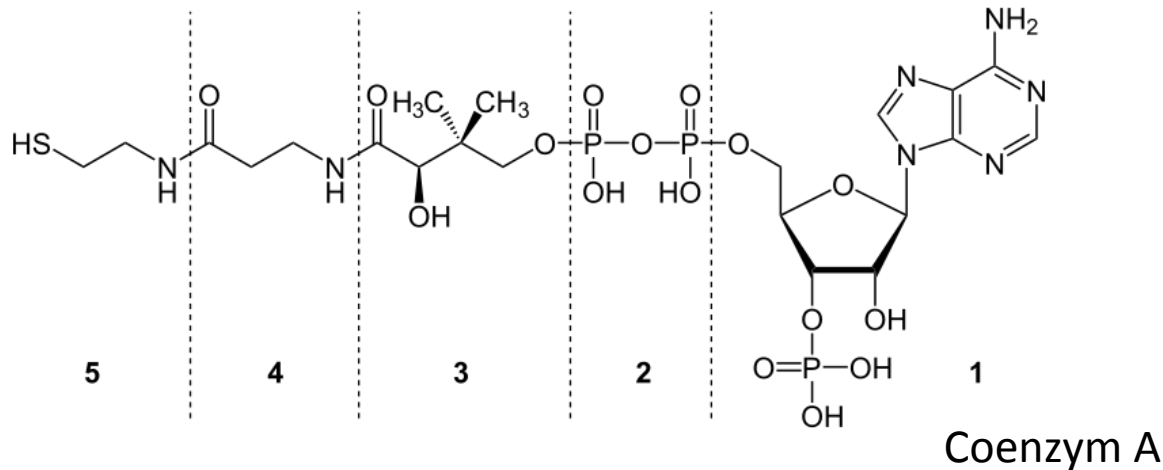
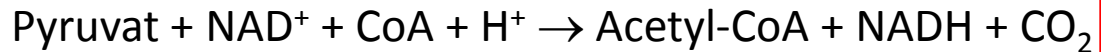
## Pyruvatoxidation verbindet Glycolyse und Citratcyclus

Pyruvat wird zu Acetat oxidiert  
Acetat wird in AcCoA umgewandelt



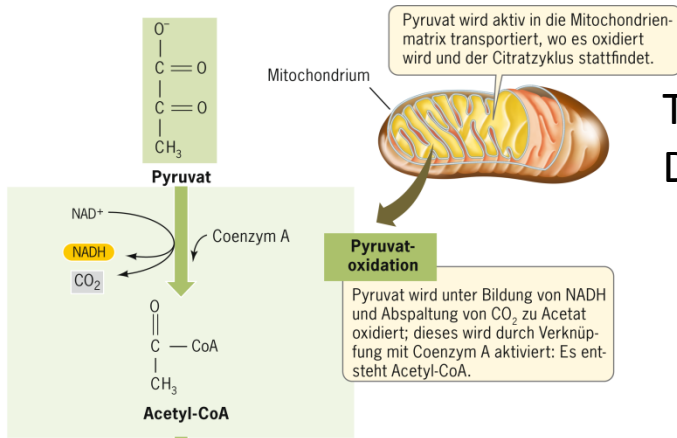
Pyruvat gelangt über aktiven Transport in Mito-Matrix

Acetyl-CoA



2 Welches sind die aeroben SW-Wege des Glucoseabbaus ?

# Citratcyclus (TCC) vollendet Oxidation der Glc zu CO<sub>2</sub>



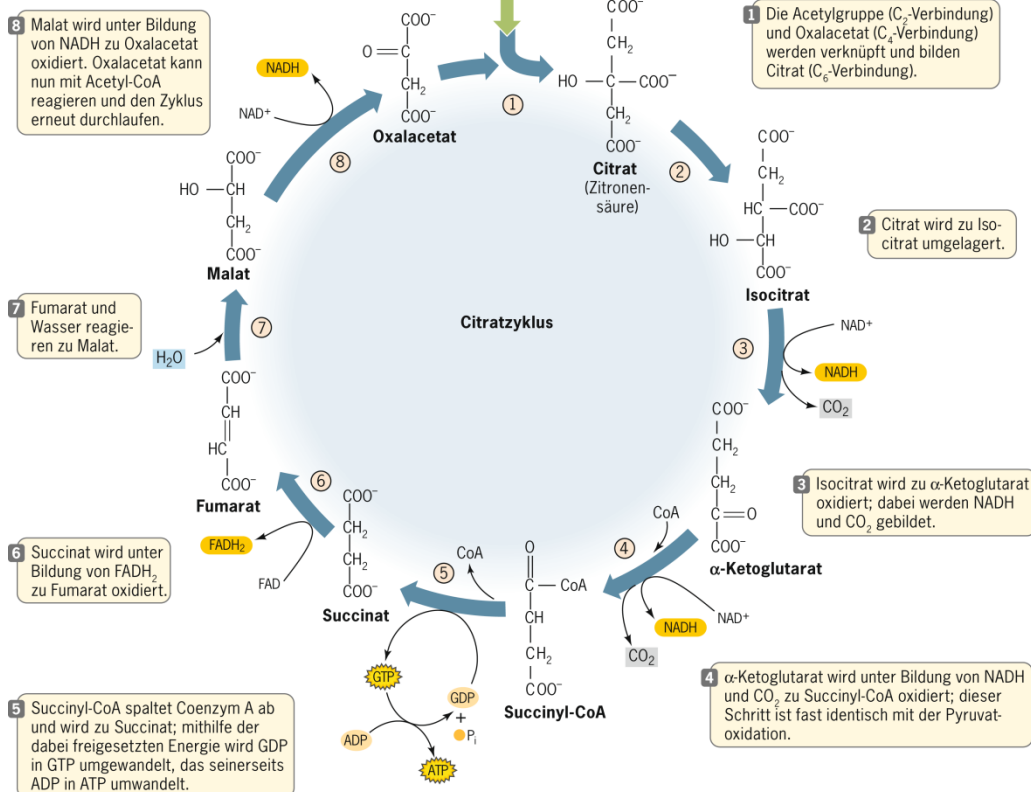
TCC befindet sich im Fließgleichgewicht Durchläuft für jedes Glc zweimal

Ablauf zusammengefasst:

**Input** in TCC besteht aus Ac in Form von AcCoA, Wasser, oxidierten e<sup>-</sup>-Carrier NAD<sup>+</sup> und FAD sowie e<sup>-</sup>-Akzeptor GDP

**Output** besteht aus CO<sub>2</sub>, reduzierten e<sup>-</sup>-Carrier NADH und FADH<sub>2</sub> sowie kleiner Menge GTP

**Bilanz:** pro Ac-Gruppe werden 2 C in Form von CO<sub>2</sub> entfernt und 4 reduzierte e<sup>-</sup>-Carrier gebildet



Acetyl-CoA und oxidierter  $e^-$ -Carrier müssen aufgefüllt sein

### Gekoppelte Redoxreaktionen

NADH/NAD<sup>+</sup> bzw. FADH<sub>2</sub>/FAD

Ist molekularer O<sub>2</sub> vorhanden, werden  $e^-$  von ihm übernommen und O<sub>2</sub> zu H<sub>2</sub>O reduziert

Pyruvatoxidation und TCC können nur ablaufen, wenn O<sub>2</sub> vorhanden

$e^-$  werden jedoch nicht direkt auf O<sub>2</sub> übertragen



### 3 Wie entsteht durch oxidative Phosphorylierung ATP?

---

#### Oxidative Phosphorylierung

Prozess besteht aus zwei grundlegenden Komponenten:

##### 1. Elektronentransport:

von NADH und FADH<sub>2</sub> fließen e<sup>-</sup> über Atmungskette  
dieser Fluss führt zu aktivem Transport von Protonen aus Mito-Matrix  
durch innere Mito-Membran -- **Konzentrationsgradient**

##### 2. Chemiosmose:

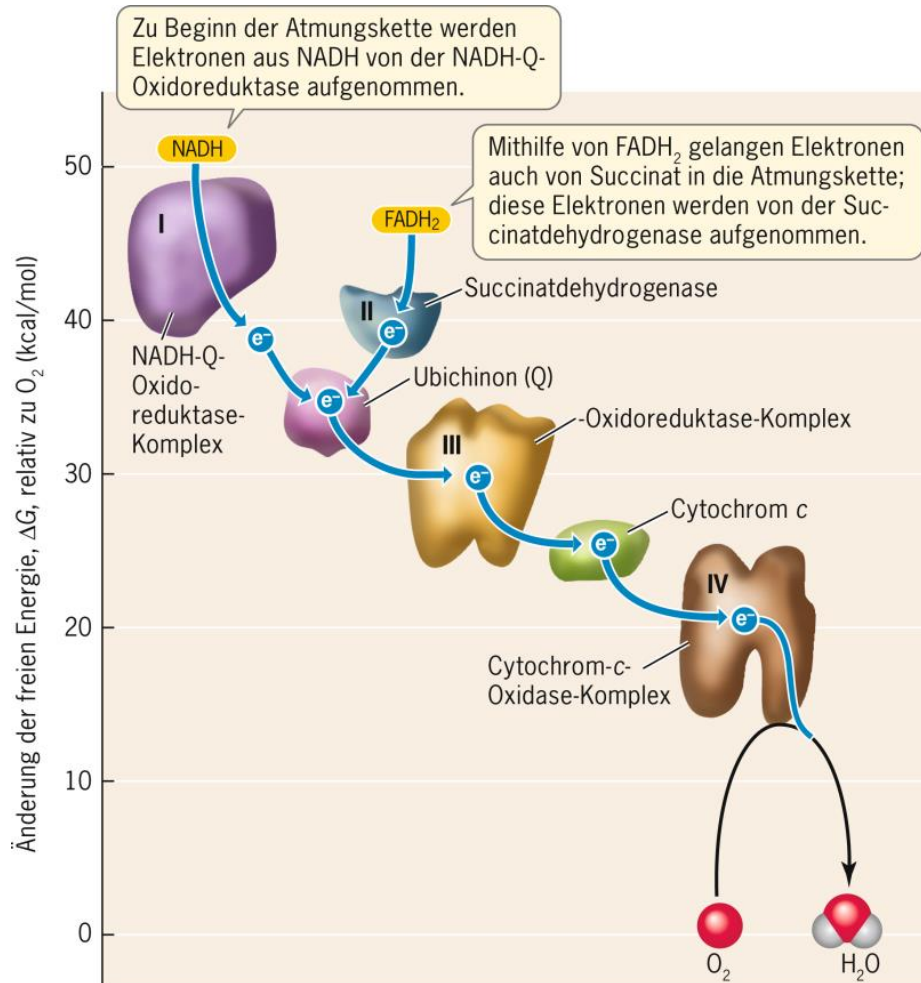
Protonen diffundieren durch Kanalprotein, die **ATP-Synthase**, zurück in die  
Mito-Matrix  
dabei gekoppelt an ATP-Synthese

**Stufenweise Abfolge von Einzelreaktionen**

3

Wie entsteht durch  
oxidative  
Phosphorylierung  
ATP?

## Atmungskette transportiert Elektronen und setzt Energie frei



### Vier große Proteinkomplexe (I-IV)

enthalten Elektronencarrier  
und deren assoziierte Enzyme  
Integrale Proteine der inneren  
Mito-Membran  
Drei davon sind transmembran

### Cytochrom c

kleines peripheres Protein  
im Zwischenraum zwischen  
innerer und äußerer Mito-  
Membran

### Ubichinon (Q)

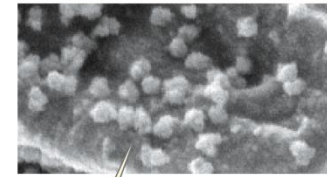
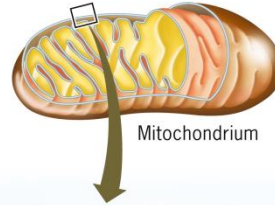
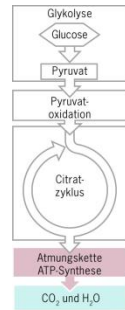
kleines unpolares Lipidmolekül  
im hydrophoben Innenbereich  
der inneren Membran

3 Wie entsteht durch oxidative Phosphorylierung ATP?

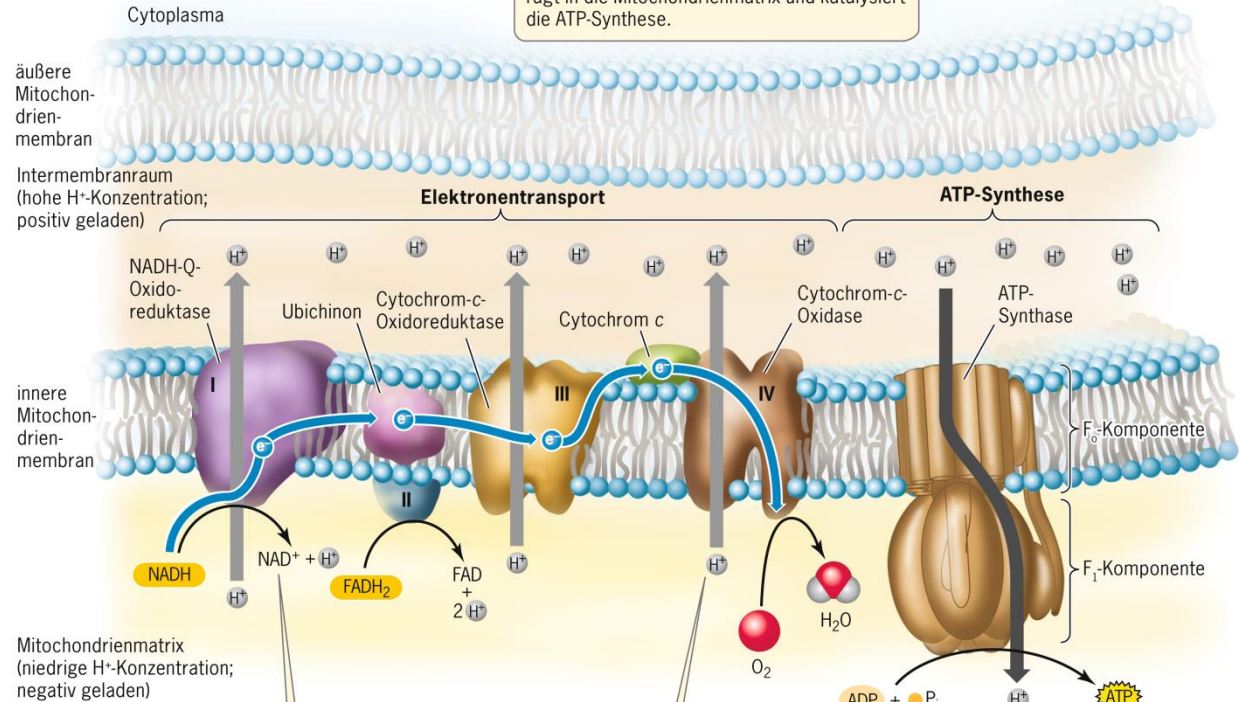
# Atmungskette transportiert Elektronen und setzt Energie frei

Mit jedem Elektronenpaar, das durch Atmungskette von NADH auf O<sub>2</sub> übertragen wird, werden etwa 2,5 ATP gebildet.

Die Oxidation von FADH<sub>2</sub> liefert etwa 1,5 ATP.



Die innere Mitochondrienmembran in starker Vergrößerung. Die F<sub>1</sub>-Komponente der ATP-Synthase, hier im Komplex mit anderen Proteinen, ragt in die Mitochondrienmatrix und katalysiert die ATP-Synthese.



1 NADH und FADH<sub>2</sub> aus Glykolyse und Citratzyklus liefern energiereiche Elektronen für die Protonenpumpen der inneren Mitochondrienmembran; diese pumpen Protonen (H<sup>+</sup>) aus der Matrix in den Intermembranraum.

2 Das Verlagern von Protonen führt zu einem H<sup>+</sup>-Konzentrationsgradienten und auch zu einer Ladungsdifferenz zwischen Intermembranraum und Matrix. Diese beiden Ungleichgewichte stellen zusammen die protonenmotorische Kraft dar.

3 Getrieben von der protonenmotorischen Kraft diffundieren Protonen durch den H<sup>+</sup>-Kanal der ATP-Synthase (die F<sub>0</sub>-Komponente) zurück in die Matrix. Dieser Protonenfluss ist an die Bildung von ATP in der F<sub>1</sub>-Komponente gekoppelt.

Konzentrationsgradient und elektrischer Gradient (elektrochemischer Gradient) –  
Quelle potenzieller Energie

**protonenmotorische Kraft**

Kopplungsmechanismus von protonenmechanischer Kraft und ATP-Synthese

**Chemiosmose**

Warum bevorzugt ATP-Synthese?

ATP verlässt nach Synthese die Mito-Matrix, da es laufend verbraucht wird  
H<sup>+</sup>-Gradient wird durch Protonenpumpen der Atmungskette laufend  
aufrechterhalten

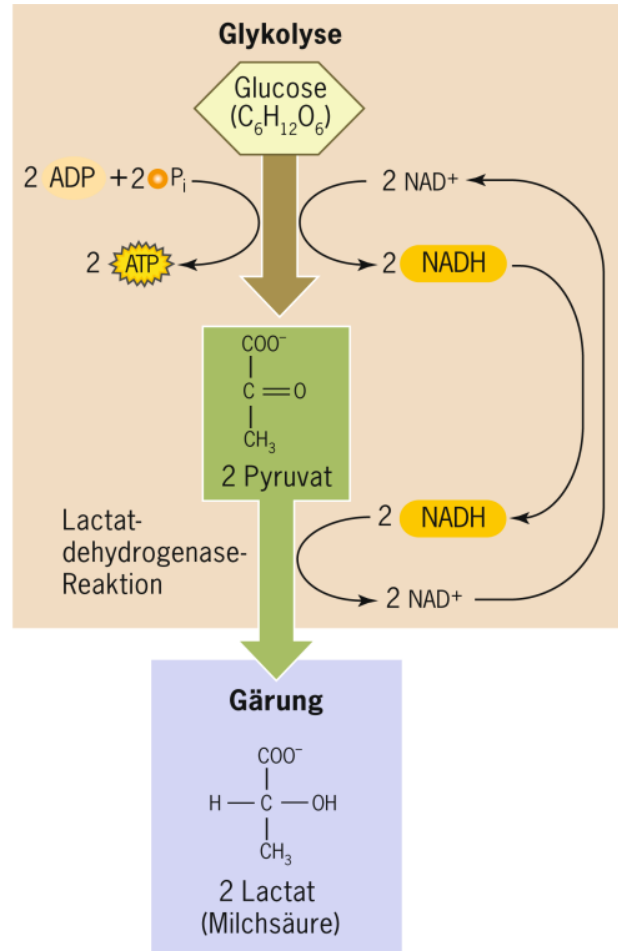
Mensch pro Tag ca.  $10^{25}$  ATP, entspricht etwa 40 kg

**Entkopplung** der Protonendiffusion und ATP-Synthese

Entkopplungsprotein Thermogenin (Winterschläfer, Neugeborene)  
zitterfreie Wärmebildung im braunen Fettgewebe

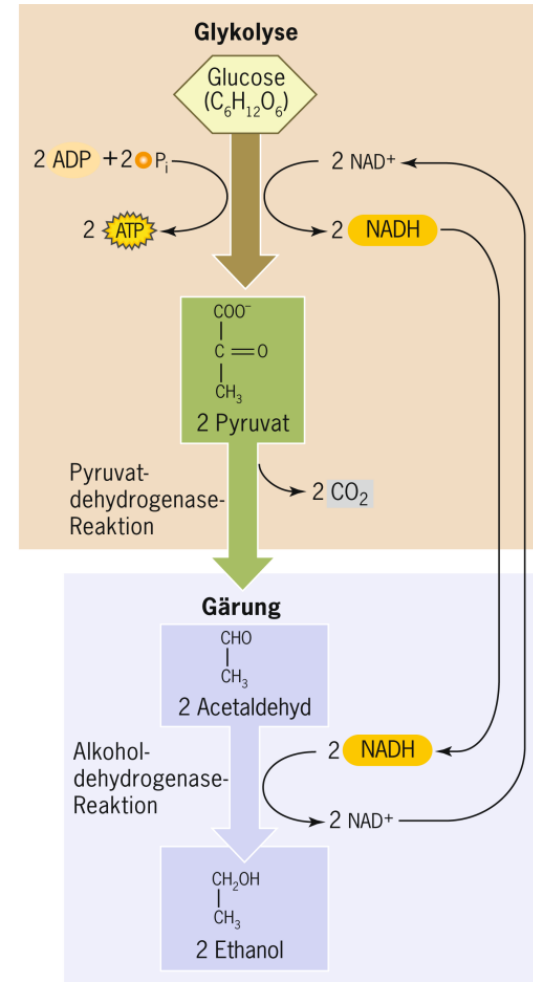
## 4 Wie läuft anaerobe Energiegewinnung aus Glucose ab?

### Milchsäuregärung: Pyruvat zu Lactat



**Summe der Reaktionspartner und Produkte:**  
 $C_6H_{12}O_6 + 2 ADP + 2 P_i \rightarrow 2 Lactat + 2 ATP$

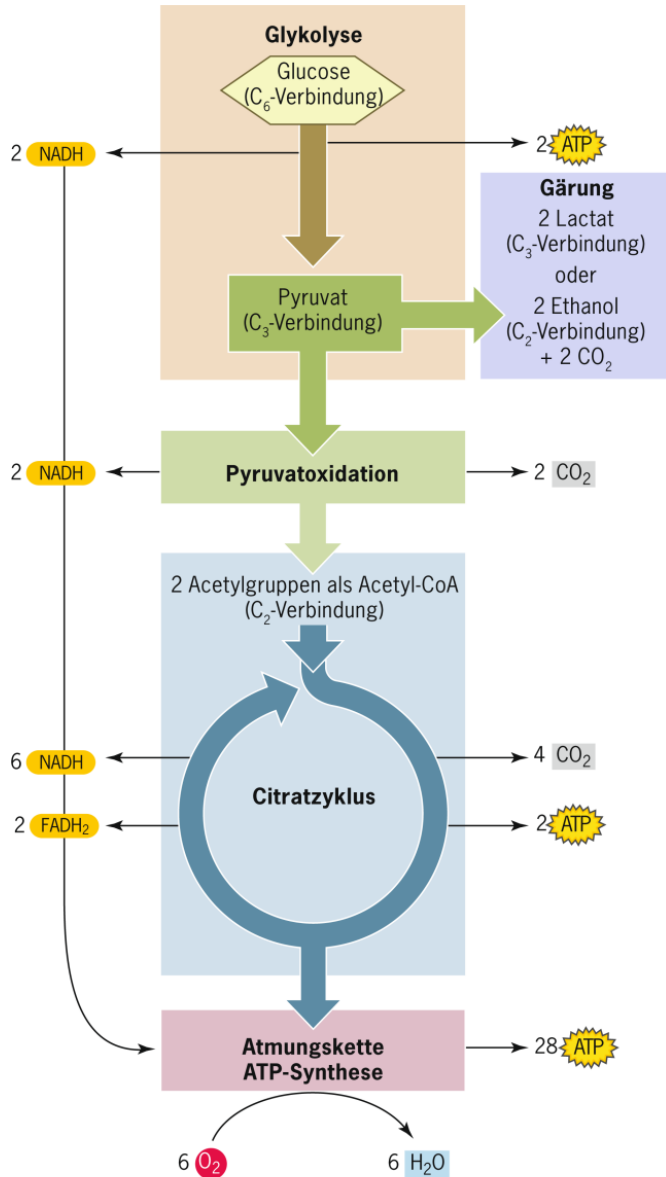
### Alkoholische Gärung: Pyruvat zu Ethanol



**Summe der Reaktionspartner und Produkte:**  
 $C_6H_{12}O_6 + 2 ADP + 2 P_i \rightarrow 2 Ethanol + 2 CO_2 + 2 ATP$

4 Wie läuft anaerobe Energiegewinnung aus Glucose ab?

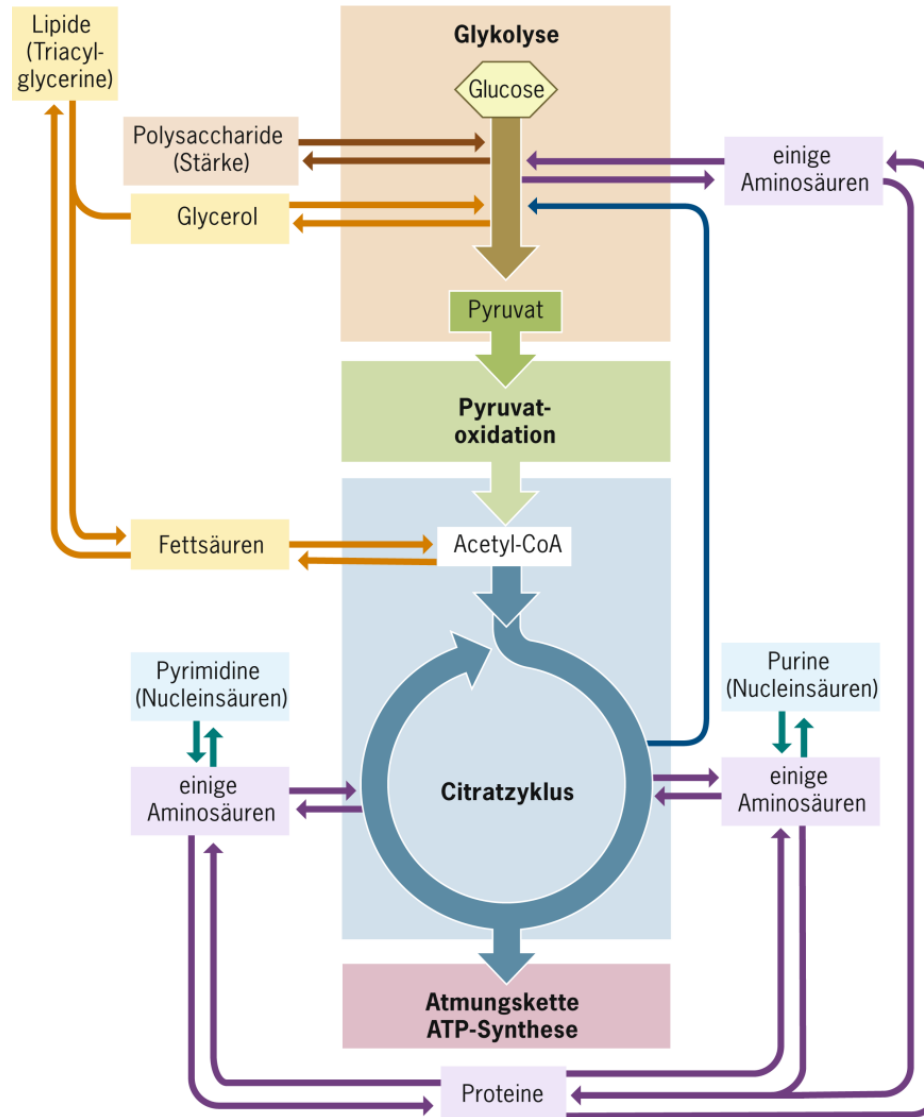
# Zellatmung liefert wesentlich mehr ATP als die Gärung



**Glykolyse und Gärung**  
 Summe der Reaktionspartner und Produkte:  
 $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 \text{ Lactat (oder 2 Ethanol + 2 CO}_2) + 2 \text{ ATP}$

**Glykolyse und Zellatmung**  
 Summe der Reaktionspartner und Produkte:  
 $C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 32 \text{ ATP}$

## 5 Wie sind SW-Wege miteinander verknüpft und wie werden sie reguliert?



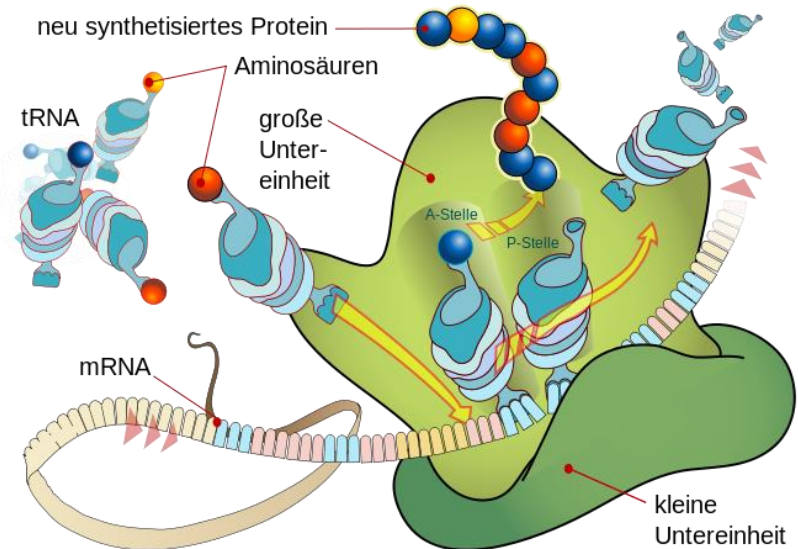
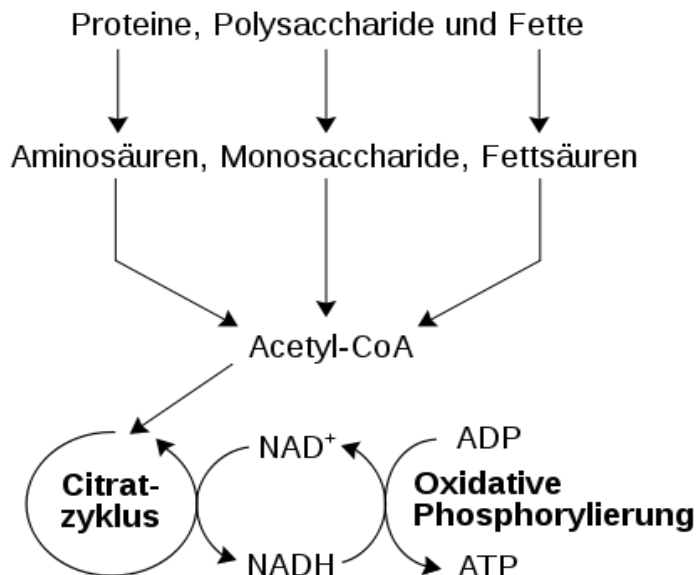


## Katabolismus und Anabolismus sind miteinander verknüpft

**Katabolismus:** Abbau von Polysacchariden, Lipiden, Proteinen

**Anabolismus:** Synthese von Metaboliten, Speicherstoffen, Strukturmolekülen, DNA, RNA....

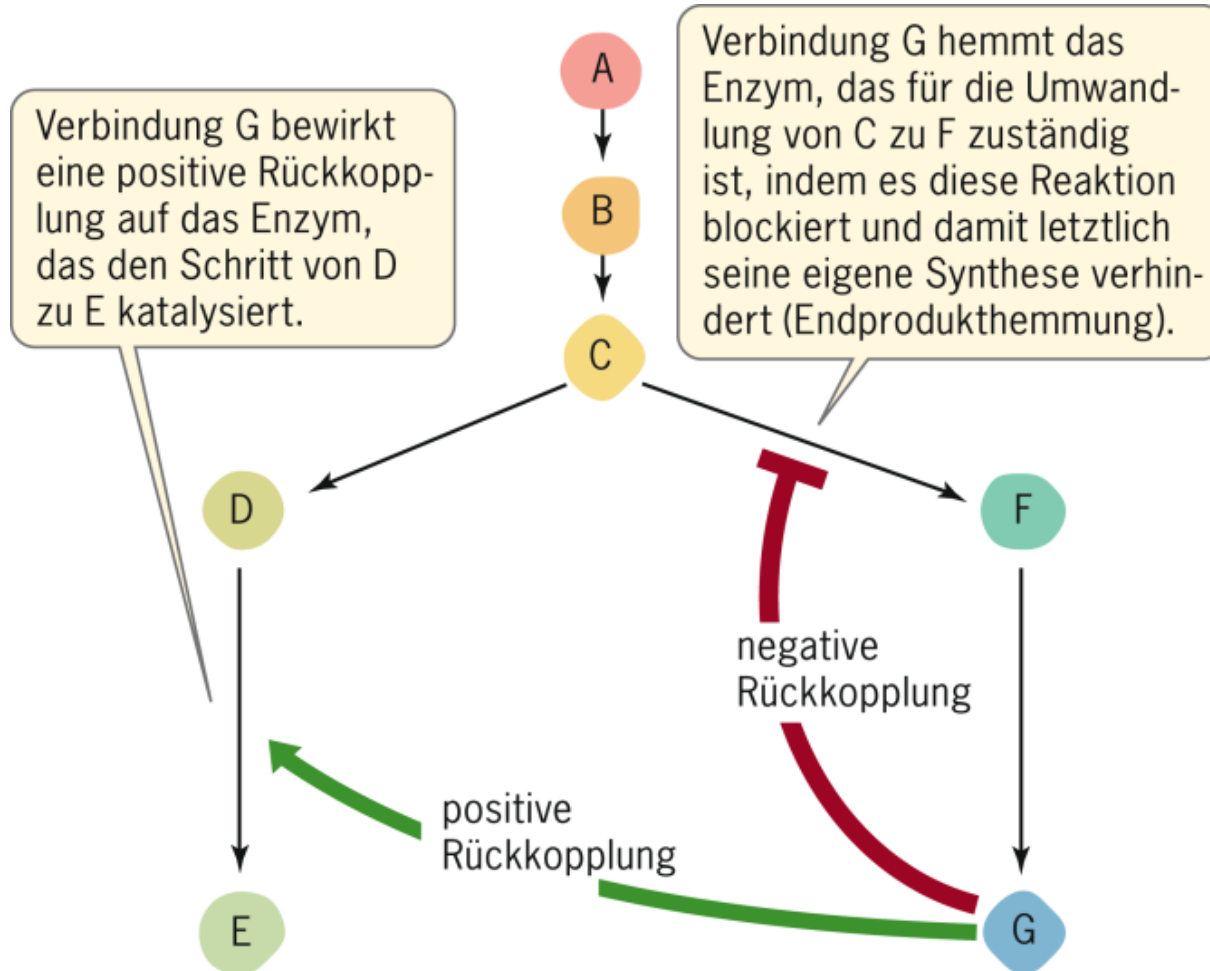
### Metabolische Homöostase



5

Wie sind SW-Wege miteinander verknüpft und wie werden sie reguliert?

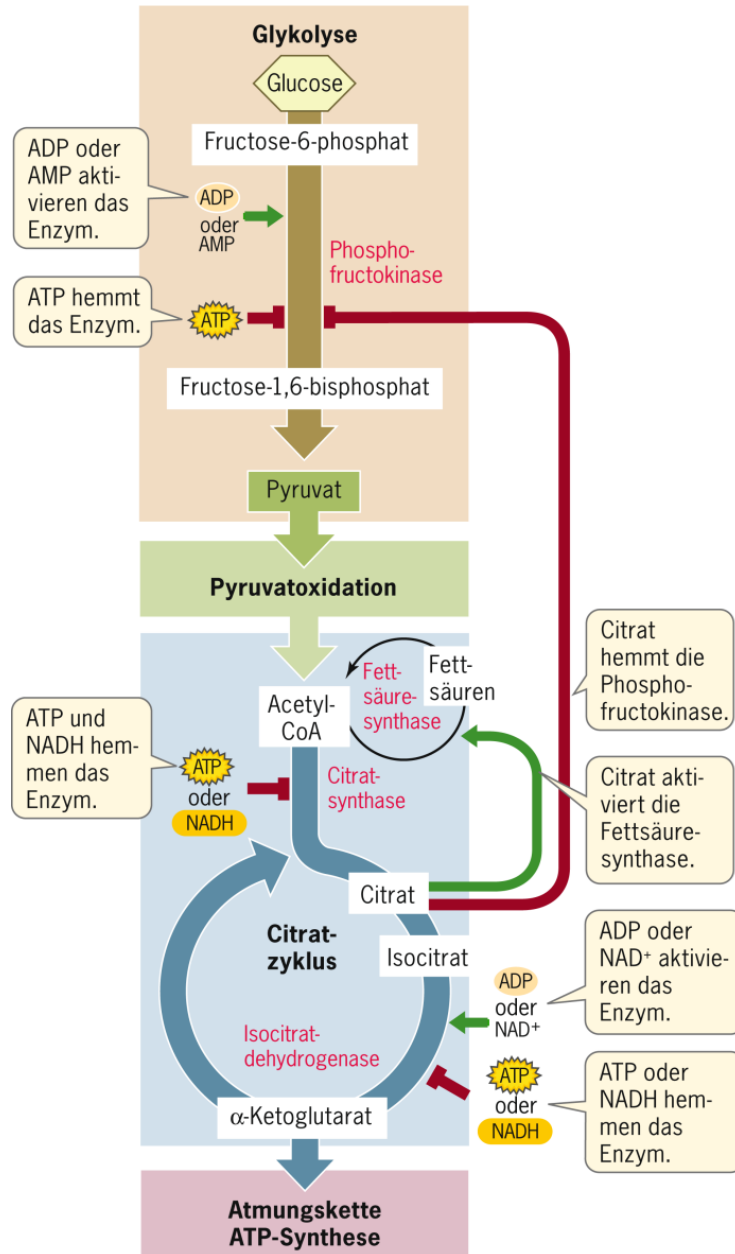
## SW-Wege werden reguliert



5

Wie sind SW-Wege miteinander verknüpft und wie werden sie reguliert?

## SW-Wege werden reguliert



## Fragenkatalog zur Grundvorlesung Biologie „Energie, Enzyme und Stoffwechselwege zur Gewinnung chemischer Energie“

1. Vergleichen Sie tabellarisch anabole und katabole Reaktionen (je zwei Merkmale)!
2. Benennen Sie die drei wichtigen Funktionen des ATP!
3. Wie wirken Enzyme hinsichtlich ihrer Substrat- und Reaktionsspezifität, auf die Reaktionsgeschwindigkeit und auf das chemische Gleichgewicht der Reaktion?
4. Bei der Enzymkatalyse spielt das aktive Zentrum eine große Rolle. Nennen Sie drei Möglichkeiten, wie das aktive Zentrum auf das Substrat einwirken kann!
5. Benennen Sie kurz, was unter „*induced fit*“ verstanden wird! Benennen Sie weiterhin drei Aufgaben des Makromoleküls!
6. Nennen Sie je ein Beispiel für eine prosthetische Gruppe, einen Cofaktor und ein Coenzym!
7. Stellen Sie in einem Diagramm dar, wie die Substratkonzentration die Reaktionsgeschwindigkeit mit und ohne Enzymbeteiligung beeinflusst!
8. Benennen Sie den Unterschied zwischen einer irreversiblen und einer reversiblen Hemmung! Welche Formen der reversiblen Hemmung gibt es?
9. Beschreiben Sie kurz die allosterische Regulation! Nennen Sie ein Beispiel für ein solches Molekül!

10. Enzyme werden von ihrer Umgebung beeinflusst. Nennen Sie zwei Einflussgrößen!
11. Welche fünf Grundsätze bestimmen Stoffwechselwege?
12. Skizzieren Sie die Abbauwege von Glucose! Wie ist der jeweilige Nettogewinn an ATP?
13. Wo (Zellkompartimente) und welche Stoffwechselwege des Glucoseabbaus finden in Procaryonten bzw. Eucryonten statt?
14. Welche Funktion hat die Atmungskette? Benennen Sie die Komplexe, die die Atmungskette bilden?
15. Vergleichen Sie Glycolyse mit anschließender Gärung bzw. mit anschließender Zellatmung hinsichtlich des Gewinns an ATP!
16. Was verstehen wir unter positiver bzw. negativer Rückkopplung? Benennen Sie Beispiele für eine positive bzw. negative Rückkopplung innerhalb oder zwischen Glycolyse und Citratcyclus!