

## Einteilung der Enzyme in verschiedene Klassen

C3BL



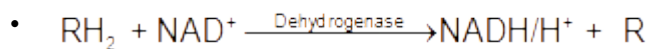
Es lassen sich verschiedene Untergruppen an Enzymen unterscheiden, von denen hier einige vorgestellt sind. Die internationale Enzymkommission vergibt vierstelligen *Enzyme Commissions Numbers (EC-Nummern)*.

### Oxidoreduktasen (Kürzel: EC 1.X.X.X.)

Zu den **Oxidoreduktasen** gehören alle Enzyme, die Redoxreaktionen katalysieren. Bei manchen Untergruppen dieser Klasse werden Redox-Cosubstrate (z.B. NADH oder NADP<sup>+</sup>) benötigt.

- **Oxidasen** entziehen einem Substrat Elektronen und übertragen diese auf molekularen Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Zusammen mit H<sup>+</sup> entsteht daraus H<sub>2</sub>O oder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Prinzip:  

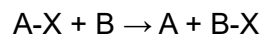
$$2 R_{\text{reduziert}} + O_2 + 4 H^+ \rightarrow 2 R_{\text{oxidiert}}^{2+} + 2 H_2O$$
 Die oxidierte Form (R<sub>oxidiert</sub>) ist nicht zwangsläufig positiv geladen
- Die **Glucose-Oxidase** (EC 1.1.3.4) ist ein Beispiel für ein wichtiges Enzym aus dieser Gruppe. Es katalysiert die Oxidation von Glucose wobei neben dem Oxidationsprodukt als Nebenprodukt auch H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> entsteht. Beim **GOD-Test (Glucose-Oxidase-Test)** wird das entstehende H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> als Cosubstrat für eine **Peroxidase** (z.B. **Meerrettichperoxidase**, EC 1.11.1.7) benötigt. Sie katalysiert die Bildung eines Farbstoffs (und H<sub>2</sub>O). Der Farbstoff kann quantifiziert werden und ist letztendlich ein Maß dafür, wie viel Glucose in der Probelösung vorlag.
- **Dehydrogenasen** oxidieren ein Substratmolekül, wobei sie gleichzeitig H<sup>+</sup> entziehen:



Formal entziehen die Enzyme dem Substrat also Wasserstoff H (H = H<sup>+</sup> + e<sup>-</sup> bzw. H<sub>2</sub> = 2 H<sup>+</sup> + 2 e<sup>-</sup>), daher kommt der Name für diese Gruppe von Enzymen („dehydrogen“ = „wasserstoffentziehend“). Die Elektronen bzw. H<sup>+</sup> werden dabei auf ein Cosubstrat, z.B. NAD<sup>+</sup>, übertragen. Durch Dehydrogenasen entstehen also **Reduktionsäquivalente**.

### Transferasen (Kürzel: EC 2.X.X.X.)

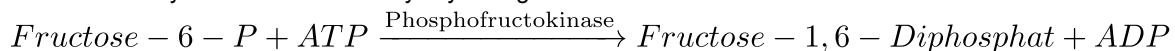
Transferasen übertragen funktionelle Gruppen von einem Molekül (Donor) auf einen Akzeptormolekül. Prinzip:



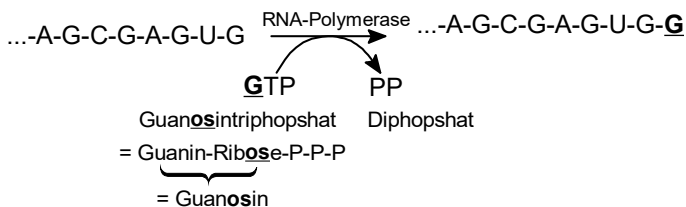
In diesem Fall ist A der Donor und B der Akzeptor.

Bei den übertragenen Gruppen kann es sich beispielsweise um eine Phosphat- (=“P<sub>i</sub>“, inorganic phosphate), Amino- oder Methylgruppen handeln. Transferasen für Phosphatgruppen werden **Kinasen** (EC: 2.7.X.X.) genannt. Als Phosphat-Donor fungiert dann meist das Cosubstrat **Adenosintriphosphat (ATP)**. Durch die Übertragung von P<sub>i</sub> entsteht dabei **Adenosindiphosphat (ADP)**.

Ein sehr wichtiges Enzym, das zu den Kinasen gehört ist die **Phosphofruktokinase** (EC: 2.7.1.11). Dieses Schlüsselenzym des Glucose-Stoffwechsels katalysiert innerhalb der Glykolyse folgende Reaktion:



Auch **DNA-** und **RNA-Polymerasen**, wie sie z.B. bei der PCR-Technik eingesetzt werden, gehören zu dieser Klasse. Sie sind für das Anhängen von Nucleotiden bei der RNA bzw. Desoxynucleotiden bei der DNA zuständig, also für die Kettenverlängerung. Als Cosubstrate nutzt die RNA-Polymerase GTP, ATP, CTP oder UTP. Diese enthalten alle Ribose als Zucker enthalten. Die DNA-Polymerase nutzt die Varianten mit Desoxyribose als Zucker.



**Abb. 1:** Schema für das Anhängen eines Nucleosids an einen RNA-Strang. Bsp. hier: GTP

### Hydrolasen (Kürzel: EC 3.X.X.X.)

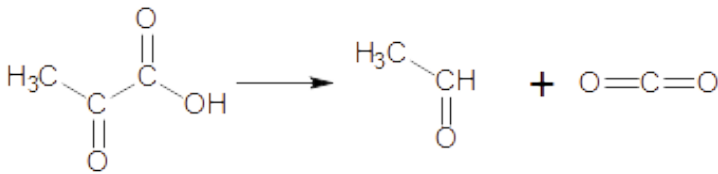
Wie der Name schon andeutet, spalten Hydrolasen Bindungen *hydrolytisch*, also unter dem Einfluss von Wasser. Dabei wird auch das Wassermolekül gespalten: X-Y + HOH → X-OH + H-Y. Zu dieser Gruppe gehören sehr prominente Vertreter:

- **α-Amylase** (EC 3.2.1.1.) spaltet die 1,4-Glykosidbindungen der Amylose, einem Stärkebestandteil. Dadurch entstehen Dextrine, Maltose und Glucose. **Invertase** spaltet Saccharose in die beiden Monosaccharide.
- Die Untergruppe der **Peptidasen** spalten die Peptidgruppen in Oligo- oder Polypeptiden und Proteinen. Dazu gehören z.B. die Enzyme Trypsin, Chymotrypsin und Pepsin. Spalten sie eine AS-Kette an den Rändern, spricht man von einer Exopeptidase, wird im Inneren des Strangs gespalten, handelt es sich um eine Endopeptidase.

- Die Untergruppe der **Esterasen** spalten Estergruppen, meist Carbonsäureester in Alkohole und Carbonsäuren.
- Zu den **Nucleasen** werden alle Enzyme gezählt, die Nucleinsäuren hydrolytisch spalten. Zwei Untergruppen der Nucleasen sind die **Desoxyribonucleasen (DNAsen)**, spalten DNA-Moleküle) und die **Ribonucleasen (RNAsen)**, spalten RNA-Moleküle). Zu den Nucleasen gehören auch die sogenannten **Restriktionsendonucleasen** (kurz: **Restriktionsenzyme**). Sie schneiden DNA im Inneren des Strangs an speziellen Erkennungssequenzen.
- Auch die  **$\beta$ -Lactamasen**, die den Lactam-Ring von Lactam-Antibiotika spalten und von Bakterien als Abwehrwaffen gegen entsprechende Antibiotika gebildet werden, gehören zur Gruppe der Hydrolasen.

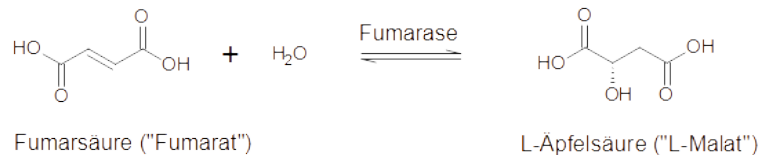
### Lyasen (Kürzel: EC 4.X.X.X.)

Lyasen sind Enzyme die Bindungsspaltungen katalysieren, wobei es sich jedoch **nicht** um eine Hydrolyse oder eine oxidative Spaltung handelt. Wird durch eine Lyase eine Einfachbindung in einem Molekül gespalten, so entstehen aus dem Substratmolekül zwei getrennte Fragmente. Die Bindungsspaltung geht mit der Bildung von Doppelbindungen einher. Ein Beispiel stellt die **Pyruvat-Decarboxylase** dar:



1. Zeigen Sie, dass sich die mittlere OZ für die Elemente nicht ändert!

Aber auch Enzyme die die entsprechende Rückreaktionen katalysieren, werden Lyasen genannt. Häufig kann ein und dasselbe Enzym sogar die Spaltung und die Synthese katalysieren.



So kann die **Fumarase** das Substrat Fumarsäure zu Äpfelsäure umwandelt, oder das Substrat Äpfelsäure zu Fumarsäure: Ist die Synthesereaktion aus zwei Substratmolekülen zu einem größeren Endprodukt wichtiger bzw. findet in größerem Ausmaß statt, so spricht man auch von **Synthasen**.

### Isomerasen (Kürzel: EC 5.X.X.X.)

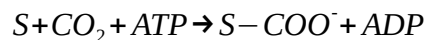
Sie katalysieren Isomerisierungen, z.B. intramolekulare Verschiebungen von funktionellen Gruppen.

### Ligasen (Kürzel: EC 6.X.X.X.)

Hierbei handelt es sich um Enzyme, die zwei Moleküle unter ATP-Verbrauch (oder GTP-Verbrauch) zu einem größeren Molekül verknüpfen.

Besonders wichtig sind **DNA-Ligasen**, die Nucleotide über Ausbildung von Phosphorsäureestern verknüpfen. So können 2 DNA-Stränge zu einem längeren DNA-Strang verknüpft werden.

- **Carboxylasen** sind Enzyme, die  $\text{CO}_2$  (meist in der gelösten Form:  $\text{HCO}_3^-$ ) als Carboxylgruppe in ein Substrat (S) einbauen. Auch dieser Vorgang ist ATP-abhängig.



Diese Enzyme sind sehr wichtig, weil organische Moleküle aus anorganischem  $\text{CO}_2$  aufgebaut werden können (z.B. während der Fotosynthese: Zucker aus Luft- $\text{CO}_2$ !)

### Translokasen (Kürzel: EC 7.X.X)

Diese Klasse beinhaltet Enzyme, die für den Transport von Stoffen durch eine Zellmembran hindurch verantwortlich sind (**Translokation**). Prinzip:  $X_{\text{OrtA}} \rightarrow X_{\text{OrtB}}$

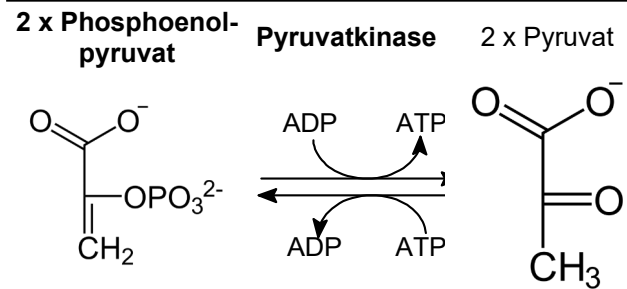
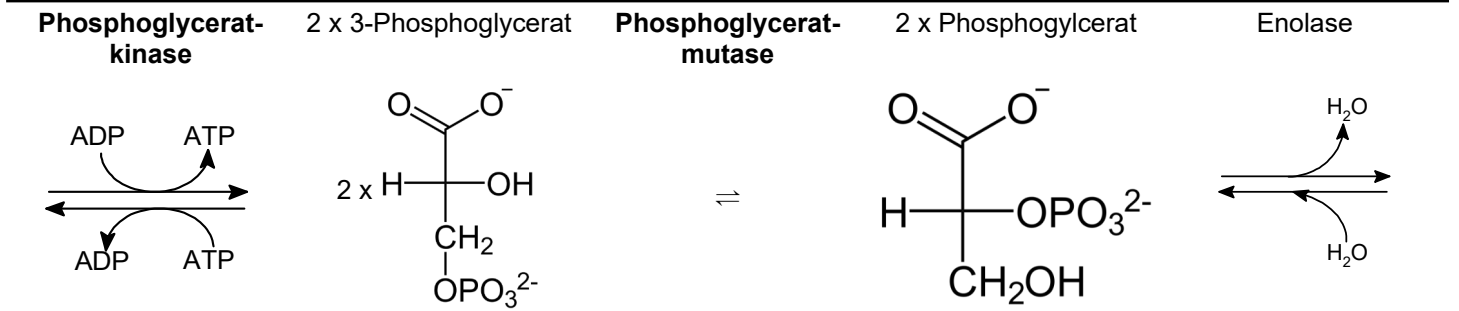
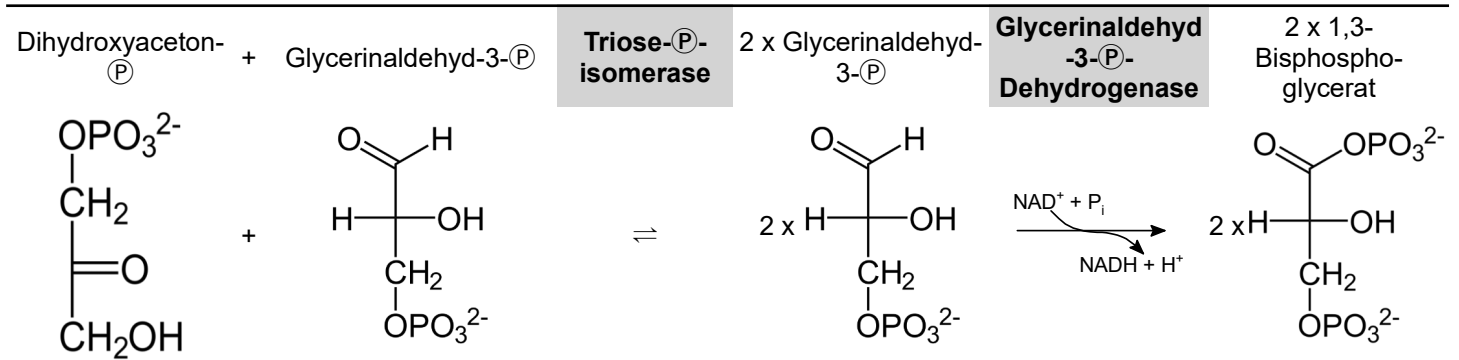
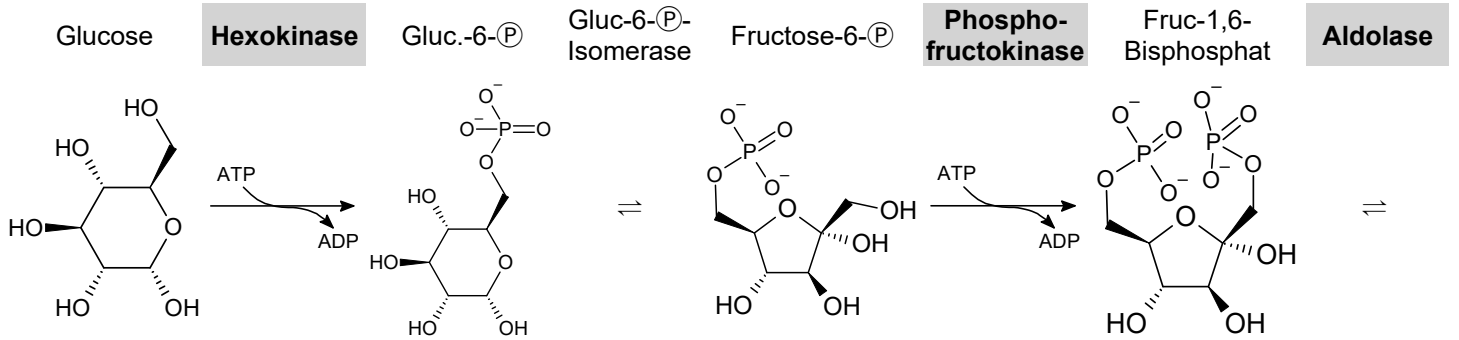
Sie wurden früher häufig in die Gruppe der Hydrolasen (EC 3.X.X.) eingegliedert, da die erforderliche Energie für diesen aktiven Transport aus der hydrolytischen ATP-Spaltung (Prinzip:  $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} + X_{\text{OrtA}} \rightarrow \text{ADP} + \text{P} + X_{\text{OrtB}}$ ) stammt. Da hier jedoch nicht die Hydrolyse selbst die Hauptfunktion ist, sondern der Transportvorgang an sich, werden sie besser in diese neue Gruppe der Translokasen einsortiert. Weiterhin sind hier auch andere Transportproteine zu finden, die im Rahmen eines Cotransports auch andere Stoffe als Cosubstrate nutzen.

**Quelle:** Diverse Wikipedia-Artikel.

**2. Übungsaufgabe: Stoffwechselweg der Glykolyse (muss man nicht auswendig können!)**

Die Glykolyse ist einer der wenigen Stoffwechselwege, den fast alle Organismen (ALLE Eukaryoten, die meisten Prokaryoten) gemeinsam haben, was auf eine sehr frühe Entstehung hinweist.

- a) Geben Sie zur Übung zu jedem Enzym der Glykolyse die Enzymklasse an.
- b) Geben Sie zu jedem Substratmolekül die Anzahl der C-Atome an (z.B.: 5 C-Atome im Molekül: C<sub>5</sub>).
- c) Bilden Sie die Stoff-, ATP- und eine Reduktionsäquivalenten-Bilanz der Glykolyse.



Anaerobier bestreiten ihren Energiestoffwechsel mit dem ATP der Glykolyse. Ihr Problem: Dabei fallen auch mehr Reduktionsäquivalente (NADH/H<sup>+</sup>) an, als sie brauchen können. Um sie zu NAD<sup>+</sup> zu regenerieren, die sie u.a. auch für die Glykolyse wieder brauchen, haben sie verschiedene Strategien entwickelt: Beispielsweise reduzieren Milchsäure-Gärer mit NADH/H<sup>+</sup> das andere Endprodukt der Glykolyse, das Pyruvat, zu Milchsäure: H<sub>3</sub>C-C(O)-COO<sup>-</sup> + NADH/H<sup>+</sup> → H<sub>3</sub>C-CH(OH)-COO<sup>-</sup> + NAD<sup>+</sup>.