

Biologie Kurs Q11 im G8, Didaktik

Biochemie des Stoffwechsels

(Teil 1 von B11.1 Strukturelle und energetische Grundlagen des Lebens)

Thomas Nickl, März 2020

Inhalt:

[Vorbemerkungen](#)

[Einführung in die Kursphase](#)

[0 Biologie – Die Wissenschaft vom Leben](#)

[I Biochemie des Stoffwechsels](#)

[1 Organisation und Funktion der Zelle](#)

[1.1 Zelltypen](#)

[1.2 Biomoleküle](#)

[1.3 Besondere Zellbestandteile](#)

[1.3.1 Die Biomembran](#)

[1.3.2 Der Chloroplast](#)

[1.3.3 Das Mitochondrium](#)

[1.3.4 Der Zellkern](#)

[1.4 Enzyme: Bau und Wirkungsweise](#)

[1.4.1 Enzyme als Biokatalysatoren](#)

[1.4.2 Spezifität von Enzymen](#)

[1.4.3 Wirkungsweise von Enzymen](#)

[1.5 Einflüsse auf die Enzymaktivität](#)

[1.5.1 Messung der Enzymaktivität](#)

[1.5.2 Substratkonzentration](#)

[1.5.3 Temperatur](#)

[1.5.4 Regulation durch Hemmstoffe](#)

[1.6 Enzym-Praktikum \(und Kompetenztraining\)](#)

Materialien:

- 01 Informationsblatt: KMK-Schlüssel (Zusammenhang von Noten und Punkten)
- 02 Informationsblatt: Operatoren
- 03 Informationsblatt: Erkenntnisgewinnung in Naturwissenschaften
- 04 Arbeitsblatt: Tierische und pflanzliche Zelle im Vergleich (Bilddatei)
- 05 Arbeitsblatt: Bau des Chloroplasten (Bilddatei „Reaktionsräume im Chloroplasten“)
- 06 Schülerformulierungen: Transport durch eine Membran
- 07 Schülerformulierungen: Entwurf für einen Versuchsaufbau

Evaluation von Vorwissen und Kompetenztraining Enzyme und Diagramme:

Lernprogramm Enzyme in Jgst. 10 und 11

Vorwissen Proteine

Vorwissen Stoff- und Teilchenebene

Vorwissen Diagrammkompetenz

Der Weg des Erkenntnisgewinns

Aufgaben zur Zwischen- und Endevaluation

Anspruchsvolle Aufgaben zu Diagrammen

Vorbemerkungen:

In der Regel fruchtet die Oberstufen-Beratung, so dass die meisten Kursteilnehmer verstehen, dass ab Beginn der 11. Jahrgangsstufe die Noten für das Abiturzeugnis zählen. Allerdings gibt es auch Jugendliche, die ihren Schlendrian aus der Mittelstufe in der Kursphase fortsetzen. Solche Fälle benötigen eine möglichst rasche Beratung.

Im Gegensatz zum Chemiekurs, in dem praktisch jedes Kapitel das Vorwissen aus den vorigen Kapiteln benötigt, reiht der Biologiekurs seine Kapitel aneinander, ohne viel Vorwissen aus anderen Stoffgebieten zu benötigen (Ausnahme: Evolution). Dafür ist der Stoff im Biologiekurs erheblich umfangreicher als im Chemiekurs.

Es ist darauf zu achten, dass nicht nur auswendig gelernt wird, sondern dass die Schüler die Zusammenhänge verstehen. Deshalb sollten möglichst wenig verzichtbare Details besprochen werden (bzw. muss klar gemacht werden, wenn etwas kein Lernstoff ist), vielmehr sollte problemorientierter Unterricht stattfinden. Es ist sinnvoll, bereits während des laufenden Unterrichts Abituraufgaben als Übungsaufgaben bearbeiten zu lassen, denn sie zeigen Möglichkeiten für Transfer auf.

Im Übergang von der Mittelstufe auf die Kursphase soll deutlich werden, dass damit der Anspruch an die Schüler steigt: Das Lerntempo wird höher, die Kompetenzen werden differenzierter angewendet, die Inhalte werden komplexer und abstrakter.

Als schriftlichen kleinen Leistungsnachweis bevorzuge ich die (angesagte) Kurzarbeit vor der (nicht angesagten) Stegreifaufgabe, weil v. a. die ehrgeizigen Kursteilnehmer damit die Möglichkeit haben, sich optimal vorzubereiten. Versäumte Kurzarbeiten müssen nicht mehr nachgeschrieben werden; dies liegt im Ermessen der Lehrkraft (ich habe Schüler, die genügend Gelegenheit geboten haben, eine gute Unterrichtsbeitrags-Note zu machen, nicht nachschreiben lassen).

ALP verweist auf Seiten im Praktikumsordner „Bio? – Logisch!“, Akademiebericht 506

Einführung in die Kursphase

- Sitzplan erstellen, ggf. Schülerfotos machen
- Prüfungsvorbereitung (mündlich, schriftlich) erfolgt auf Basis des Hefteintrags
- Arbeit mit dem Buch: unaufgefordert nach jeder Stunde zuhause die entsprechenden Abschnitte nachlesen; Unklarheiten notieren und nachfragen. (Was in der Stunde nicht behandelt wurde, aber im Buch steht, ist kein Prüfungsstoff.) Entscheidung: Buch bleibt zuhause / wird mitgenommen.
- Verständnisfragen sollen zu Stundenbeginn vor der Rechenschaftsablage gestellt werden (möglichst konkret, also nicht: „Können Sie die Photosynthese nochmal erklären.“).
- Fehlstunden und Zuspätkommen:
 - klarer Hinweis auf die an der Schule übliche Regelung
 - Versäumter Stoff muss selbstständig nachgelernt werden.
- Notenbildung:
 - klare Vorgaben, z. B.: pro Semester 1 Klausur, mindestens 1 mündliche Leistung, 1 Kurzarbeit
 - ggf. Ersatzprüfung über das ganze Semester bei entsprechenden Fehlzeiten (*das ist mehr Stoff als für die Klausur; Regelung am Rupprecht-Gymnasium München*)
 - Gewichtung: großer Leistungsnachweis zu Schnitt der kleinen Leistungsnachweise wie 1 zu 1

- Rechenschaftsablage über die letzten beiden Stunden plus Grundwissen (von der GSO vorgeschrieben)
- Rechenschaftsablage grundsätzlich über die letzten beiden vom Schüler besuchten Stunden, auch wenn Fehlstunden dazwischen liegen (steht nicht in der GSO => muss von der Fachschaft festgelegt und am Anfang von Q11 dem Kurs mitgeteilt werden).
- klare Kriterien zur Erstellung von Unterrichtsbeitrags-Noten
- ggf. Referate
- ggf. weitere Alternativen für kleine Leistungsnachweise
- **Informationsblatt** KMK-Schlüssel schriftlich an die Schüler austeilen (*denn die bekommen ihn nicht immer bei der Oberstufen-Beratung*)
- Überblick über die Themen des Schuljahres (sehr kurz!); ggf. das **Informationsblatt** Grundwissen Q11 austeilen
- **Informationsblatt** „Operatoren“ austeilen, einzelne Operatoren explizit ansprechen und miteinander vergleichen wie *beschreiben, erklären, erörtern* usw.

0 Biologie – Die Wissenschaft vom Leben

Auch wenn dieser Stoff nicht im G8-Lehrplan von Q11 steht, ist es sinnvoll, zum Einstieg in die Kursphase das Vorwissen zur Biologie aus der 5. Klasse auf ein oberstufengemäßes Niveau zu heben. Der Absatz „Die Wissenschaft“ ist eine übergeordnete Betrachtung, die nicht einfach vorausgesetzt werden kann und deshalb explizit besprochen werden sollte (auch in Chemie und Physik).

Durchführung einer anonymen Umfrage zum Vorwissen aus der Mittelstufe (wird ausgewertet und zeitnah besprochen): **Arbeitsblätter** zur Evaluation

Die beiden Begriffe in der Überschrift sollten auf hohem Niveau durchleuchtet werden. In den ersten Stunden nach den Ferien sind die Kursteilnehmer erfahrungsgemäß noch neugierig und sehr aufnahmebereit, so dass dieses etwas abgehobene Thema in der Regel gut ankommt, wenn es kurz und bündig angesprochen wird.

Das Leben:

- Wiederholung der Kennzeichen des Lebens, moderner formuliert: Anforderungen an Lebewesen (v. a. Stoffwechsel, aktive Bewegung, Reizbarkeit, Fortpflanzung, Wachstum)
- Leben basiert auf komplexen organischen Molekülen.
- Belebte Materie unterscheidet sich von nicht belebter v. a. durch eine enorme Menge an Information.
- Leben existiert in unterschiedlichen Ebenen (Zelle, Gewebe, Organ, Organismus, Lebensgemeinschaft).

Die Wissenschaft:

- sammelt und klassifiziert Beobachtungen (die Betrachtungsebenen in der Biologie: makro-, mikro-, sub-mikroskopisch; in Chemie: Stoff-Ebene (makroskopisch) und Teilchen-Ebene (submikroskopisch); ggf. Einsatz entsprechender **Ikons**)
- erstellt Erklärungsmodelle (Hypothesen)
- überprüft Hypothesen durch gezielte Beobachtungen und Untersuchungen (dazu gehören auch Experimente); reine Wahrnehmung ist keine objektive Messung!
- Eine Theorie besteht aus Hypothesen, die vielfach verifiziert, aber in keinem einzigen Fall falsifiziert wurden (Karl Popper, 1935).
- Bei zwei möglichen (verifizierten) Hypothesen gilt die einfachere, die weniger Zusatzannahmen benötigt, als die wahrscheinlichere.
- Paradigmenwechsel (Thomas Kuhn, 1962): Lange Zeit hindurch orientiert sich die Wissenschaft an einer Theorie, bis sie eindeutig falsifiziert wird. Daraufhin wird sie ersetzt durch eine plausiblere Theorie (meist dauert das bis zur nächsten Generation von Wissenschaftlern).

Beispiele für falsifizierte Theorien:

- die Äther-Theorie: „Licht benötigt zu seiner Ausbreitung ein Medium, den Äther, der das gesamte Weltall füllt.“ Falsifiziert in den 1880er Jahren durch Albert Michelson und Edward Morley, die feststellten, dass sich Licht immer gleich schnell ausbreitet, unabhängig davon, ob es sich in Richtung der Erddrehung ausbreitet oder quer dazu.
- die Phlogiston-Theorie: „Beim Verbrennen von Metallen entweicht der Feuerstoff Phlogiston.“ (Metalle wurden als Verbindung von „Kalk“, der dem heutigen Metalloxid entspricht, und Phlogiston betrachtet.) Falsifiziert in der ersten Hälfte der

1770er Jahre durch Antoine Lavoisier, der feststellte, dass die Verbrennungsprodukte von Metallen schwerer sind als die Metalle selbst, dass also bei der Verbrennung eine Komponente hinzu kommt anstatt entweicht.

Die Erkenntnistheorie, auf der naturwissenschaftliches Arbeiten heute basiert, geht auf Popper und Kuhn zurück. (Vgl. Alexander Mäder: „Gute Theorien, schlechte Theorien“ in Spektrum der Wissenschaft März 2020, S. 84-87).

Hinweis für die Kursteilnehmer: Die Frage nach dem Leben hat bereits viele Antworten. Um sie zu verstehen, wird sicheres Grundwissen v. a. in Stoffwechselbiologie, Genetik und Evolution benötigt.

Informationsblatt: Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften

Der Inhalt dieses Skripts ist anspruchsvoll, darf aber dennoch nicht zu viel Zeit kosten. Nur die Grundgedanken daraus sollten Lernstoff sein, nicht die Details.

Film VisCog zur Problematisierung individueller Wahrnehmung (Erklärung dazu auf dem Informationsblatt Erkenntnisgewinnung, Seite 2)

[<https://www.youtube.com/watch?v=vJG698U2Mvo>]

I Biochemie des Stoffwechsels

Strukturelle und energetische Grundlagen des Lebens

Zu dem gesamten Abschnitt (einschließlich Photosynthese und Abbau) gibt es ein ISB-Skript von 2013, an dem auch ich mitgearbeitet habe. Es zeigt u. a., wie knapp die Unterrichtszeit für das doch sehr komplexe Thema angesetzt ist. In diesem Skript sind viele Hinweise auf Untersuchungen, aus denen aufgrund der Zeitknappheit eine enge Auswahl getroffen werden muss.

[http://www.isb.bayern.de/gymnasium/materialien/der_biologie_lehrplan_der_jahrgangsstufe_11/]

1 Organisation und Funktion der Zelle

Der Aufbau von Zellen war bereits Thema in der 8. Klasse. Eine Wiederholung zu den Zelltypen, den Biomolekülen (Typen der Nährstoffe im engeren Sinn = Makronährstoffe) und den wesentlichen Zellorganellen kann als vorbereitende Hausaufgabe gestellt und danach im Unterricht zügig (!) besprochen werden.

1.1 Zelltypen

kutos, griechisch / *cyta*, lateinisch: Körper, Behälter

1.1.1 Prokaryoten: Bakterienzelle

karyon, griechisch: Kern; *pro*, griechisch: vor

Skizze mit ringförmigem Bakterienchromosom, Ribosomen (kleiner als bei Eukaryoten), Cytoplasma, Zellmembran, Zellwand, Geißel

1.1.2 Eukaryotenzelle

eu-, griechisch: gut

Arbeitsblatt: Tier- und Pflanzenzelle im Vergleich

Spiel „Ich packe meinen Koffer...“ ALP Blatt 13_v18 (1. Auflage); 13_v15 (2. Auflage)

Beschriftung der sechs Zellbestandteile in der tierischen Zelle; Einfügen der entsprechenden Nummern bei der pflanzlichen Zelle; dort Ergänzung weiterer Nummern für pflanzentypische Zellbestandteile sowie Beschriftung.

Hinweis: Es ist wenig sinnvoll, an dieser Stelle weitere Zellbestandteile zu besprechen, weil v. a. schwächere Kursteilnehmer dann durcheinander kommen. Es ist wichtiger, dass sie Mitochondrien und Chloroplasten sicher erkennen und benennen, als dass sie von Lysosomen oder Leukoplasten gehört haben, ohne sich ein mentales Bild davon zu machen. Ergo: Nicht stoffhubern!

Vergleich von Pro- und Eukaryotenzellen:

- **Kompartimentierung:** Eukaryotenzellen besitzen aufgrund ihrer vielfältigen Organellen mehrere durch Biomembranen voneinander abgegrenzte Reaktionsräume. Dies ermöglicht einen differenzierteren und effektiveren Stoffwechsel als die in ihrem Inneren nicht kompartimentierte Prokaryotenzelle.
- **Erbinformation:** In beiden Fällen DNA, aber in Prokaryotenzellen nur kurz, ringförmig und „nackt“ (ohne Hilfsproteine), dagegen in Eukaryotenzellen meist umfangreich, linear, auf Hilfsproteine gewickelt und (meist) in mehrere Chromosomen aufgeteilt.
- **Ribosomen:** gleiche Funktion (Proteinsynthese), aber in Prokaryotenzellen kleiner als in Eukaryotenzellen

1.2 Biomoleküle

In allen Schulzweigen sind die Biomoleküle Stoff im Chemie-Unterricht der 10. Klasse, kommen aber außerhalb des naturwissenschaftlich-technischen Zweigs aufgrund von Zeitnot etwas zu kurz. Deshalb an dieser Stelle keine Strukturformeln verwenden, sondern graphische Symbole (in denen zwar jeweils eine Strukturformel stehen kann, die aber keinen Lernstoff bildet). Auch wenn der G8-Lehrplan diesen Abschnitt nicht nennt, so setzt er ihn doch voraus (wovon in der Praxis aber oft nicht ausgegangen werden kann).

1.2.1 Kohlenhydrate (das Kohlenhydrat)

Darauf achten, dass das „n“ nicht vergessen wird, wie das so oft in den Medien der Fall ist, denn „Kohlenhydrat“ ist die Kurzform von „Kohlenstoffhydrat“, abgeleitet von der Teilsummenformel $C_n(H_2O)_n$.

mittelfristige Energiespeicher:

- der Traubenzucker = die Glucose (z. B. als Sechseck dargestellt)
- der Fruchtzucker = die Fructose (z. B. als Fünfeck dargestellt)

Langzeit-Energiespeicher:

- die Stärke, aufgebaut aus Glucose-Einheiten (z. B. als Kette aus Sechsecken)

Baustoff:

- der Zellstoff = die Zellulose, aufgebaut aus Glucose-Einheiten, die anders verknüpft sind als in der Stärke (in der Zellwand von Pflanzenzellen)

1.2.2 Fette und Lipide

Fette sind Langzeit-Energiespeicher.

Ein Fett-Molekül ist aufgebaut aus einem „Rückgrat“ aus Glycerin (z. B. als kurzer Balken dargestellt), an dem drei Fettsäurereste hängen (z. B. als unterschiedlich lange Balken dargestellt).

Ein Lipid-Molekül entspricht einem Fett-Molekül, bei dem ein Fettsäurerest durch ein anderes funktionelles Bauteil (z. B. als Ellipse dargestellt) ersetzt ist. Phospholipide (mit zwei Fettsäureresten und einem Phosphorsäurerest) sind Bestandteile von Biomembranen. Die Phosphatgruppe ist negativ geladen und deshalb gut wasserlöslich (hydrophil), der Rest des Moleküls ist gut fettlöslich (hydrophob).

1.2.3 Proteine

das Protein = der Eiweiß-Stoff

Aufbau: unverzweigte Kette aus sehr vielen Aminosäuren (z. B. als Kette aus unterschiedlich geformten und unterschiedlich gefärbten graphischen Elementen dargestellt)

Beispiele: Hämoglobin, Antikörper des Immunsystems, Tunnelproteine zum Stofftransport durch eine Membran, Muskelproteine, Enzyme, Peptid-Hormone wie Insulin ...

Eine extreme Vielfalt innerhalb der Proteine ist deshalb möglich, weil sehr lange Ketten aus den klassischen 20 Aminosäure-Typen quasi unendlich viele Kombinationen erlauben. Die sehr komplexe Faltung der Kette erzeugt eine hochspezifische, sehr differenzierte Molekül-Oberfläche, die entscheidend für die Funktion des Proteins ist (prinzipieller Unterschied zu Fetten und Polysacchariden).

Hinweis: Nur diese wesentlichen Aspekte der Proteine plakativ heraus arbeiten, keine Details wie die Abgrenzung von Proteinen und Proteiden, die Definition von Proteinen im engeren Sinn als Polymere ab 100 Aminosäuren oder die Namen bzw. Formeln einzelner Aminosäuren!

1.3 Besondere Zellbestandteile

Im ISB-Skript wird vorgeschlagen, eine Stunde für Mikroskopie zu verwenden. Das habe ich an dieser Stelle aus Zeitnot aber nie getan; es genügt, gute licht- und elektronenmikroskopische Aufnahmen zu projizieren und zu besprechen.

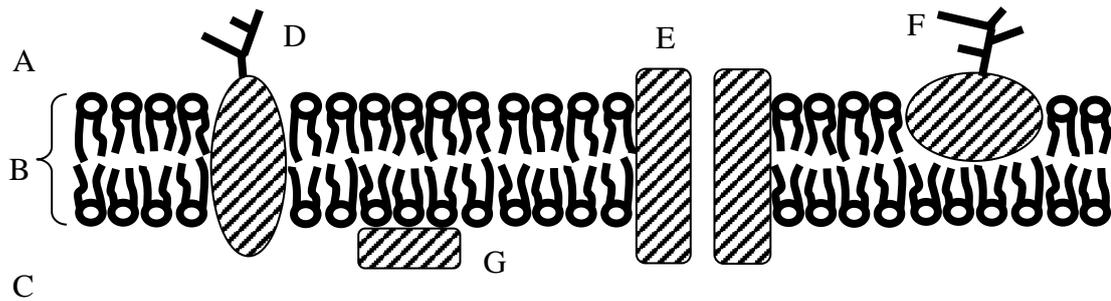
Die Biomembran wird ausführlicher behandelt, die drei übrigen Zellbestandteile (und nur diese, denn der G8-Lehrplan nennt keine weiteren!) nur knapp.

Das Lichtmikroskop vergrößert etwa bis tausendfach, das Elektronenmikroskop vergrößert etwa bis millionenfach. Membranstrukturen oder Ribosomen sind nur elektronenmikroskopisch sichtbar.

1.3.1 Die Biomembran

das Flüssig-Mosaik-Modell:

- Phospholipide (vgl. 1.2.2) bilden eine Doppelschicht aus, wobei die wasserlöslichen Anteile (Phosphatgruppen) nach außen weisen und die fettlöslichen Anteile (Fettsäurereste) nach innen. *(Nur graphische Symbole, keine Formeln!)*
- In diese Doppelschicht sind Proteine eingelagert: Periphere Proteine sitzen außen auf der Lipiddoppelschicht, integrale Proteine sitzen (ganz oder abschnittsweise) innerhalb der Doppelschicht; Tunnelproteine erstrecken sich quer durch die gesamte Doppelschicht und besitzen in ihrem Inneren einen Kanal zum Stofftransport.
- „Flüssig-Mosaik“ bedeutet: Die Moleküle der Membran können sich gegeneinander bewegen.
- Nur bei der Zellmembran können Proteine auf der Außenseite der Zelle mit kurzen, oft verzweigten Kohlenhydratketten besetzt sein (Spitzname: Zuckerbäumchen).



Reaktionsräume:

- A extrazellulärer Raum
- B Phospholipid-Doppelschicht
- C Cytoplasma

Membranproteine:

- D integrales Protein mit Kohlenhydratkette
- E Tunnelprotein
- F integrales Protein mit Kohlenhydratkette
- G peripheres (aufgelagertes) Protein

Modell einer Zellmembran als Beispiel für eine Biomembran

[Abb. aus dem ISB-Skript „Strukturelle und energetische Grundlagen des Lebens“, S. 4; angefertigt von mir]

Aufgaben von Biomembranen:

- **Kompartimentierung:** Trennung von Reaktionsräumen (vgl. 1.1.2)
- **selektiver Transport:**
 - **passiver** Transport durch **Diffusion** entlang eines Konzentrations-Gefälles (Konzentrations-Gradient): fettliebende Teilchen gehen direkt durch die Membran; bestimmte Teilchen wandern durch Tunnelproteine; ohne Energieaufwand
 - **aktiver** Transport bestimmter Teilchen auch entgegen eines Konzentrations-Gefälles unter Energieaufwand* (ATP-Verbrauch) durch Carrier-Proteine
- **Oberflächenvergrößerung** durch Membran-Faltung erhöht die Transport-Kapazität
- Eine **semipermeable** Membran ist für bestimmte Teilchen durchlässig, für andere dagegen nicht. Als **Osmose** bezeichnet man den gerichteten Fluss von Teilchen durch eine semipermeable Membran. *semi*, lateinisch: halb, teilweise; *permeare*, lateinisch: hindurch gehen; *osmos*, griechisch: Eindringen, Antrieb

**Achten Sie auf korrekte Fachsprache: ATP wird verbraucht, denn daraus entsteht ADP und Phosphat. Aber Energie wird nicht verbraucht und nicht neu geschaffen, nur umgewandelt („Energieverbrauch“ ist eine falsche Formulierung!)*

Die Schüler sollen eine Biomembran skizzieren und beschriften können (vgl. Abb. oben). Sie sollen wissen, dass nur eine Zellmembran Zuckerbäumchen besitzt und auch nur auf der Außenseite.

Fakultativ: Kursteilnehmer basteln (als Hausaufgabe) Membranmodelle.

Manche Abituraufgaben zum Transport durch Membranen sind sehr anspruchsvoll und sollten deshalb als Übungsaufgaben dienen.

Modellversuch zur Diffusion: ALP Blatt 13_v01

Modellversuche zur Osmose: ALP Blätter 13_v03 bis v13

Hinweis: maximal 1 Versuch durchführen!

Dynamisches Modell einer Biomembran: ALP Blatt 13_v17 (eine W-Seminararbeit)

Material: Sammlung von Schülerformulierungen zum Transport durch die Membran.

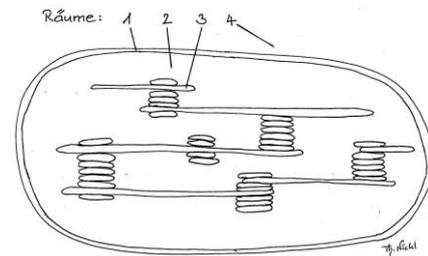
1.3.2 Der Chloroplast

Arbeitsblatt: Reaktionsräume im Chloroplasten (Bilddatei)

Es ist sinnvoll, wenn die Kursteilnehmer in diesem Bild die drei Reaktionsräume des Chloroplasten unterschiedlich anfärben.

Lösung:

- 1 Intermembran-Raum zwischen äußerer und innerer Hüllmembran
- 2 Matrixraum / die Matrix*
- 3 Thylakoid-Innenraum**
- 4 Cytoplasma außerhalb des Chloroplasten / extrazellulärer Raum



* *Hinweis: In den Lehrbüchern wird nicht mehr unterschieden zwischen Stroma (beim Chloroplasten) und Matrix (beim Mitochondrium), sondern einheitlich der Begriff Matrix verwendet. Das ist auch sinnvoll.*

** *Hinweis: Die Thylacoid-Membran bildet ein geschlossenes System, umhüllen einen einzigen zusammenhängenden Raum und stehen nicht in Verbindung mit der inneren Hüllmembran.*

- Die Hülle des Chloroplasten besteht aus einer Doppelmembran*.
- Die Thylacoid-Membran dient der Kompartimentierung und der Oberflächenvergrößerung.
- Der Chloroplast ist der Ort der Photosynthese.
- Der Chloroplast enthält eine kurze, ringförmige DNA und Ribosomen vom Bakterientyp.

Alle weiteren Details werden erst im Abschnitt „Photosynthese“ besprochen.

** Manche Schüler verwechseln Doppelmembran mit Lipid-Doppelschicht!*

1.3.3 Das Mitochondrium

Die Binnenstruktur ist auf dem Arbeitsblatt zum Vergleich von tierischer und pflanzlicher Zelle zu sehen (vgl. Abschnitt 1.1.2).

- Die Hülle des Mitochondriums besteht aus einer Doppelmembran.
- Die innere Hüllmembran ist stark gefaltet; sie dient der Kompartimentierung und der Oberflächenvergrößerung.
- Das Mitochondrium ist der Ort der Zellatmung (auch wenn der erste Teilabschnitt, die Glycolyse, im Zellplasma abläuft).
- Das Mitochondrium enthält eine kurze, ringförmige DNA und Ribosomen vom Bakterientyp.

1.3.4 Der Zellkern

Vgl. Arbeitsblatt zum Vergleich von tierischer und pflanzlicher Zelle (Abschnitt 1.1.2)

- Die Hülle des Zellkerns besteht aus einer Doppelmembran und besitzt viele Kernporen, durch die u. a. m-RNA-Moleküle hindurch treten. (Kernporen sind keine einfachen Löcher, sondern streng kontrollierte Pforten.)
- Die äußere Kernmembran geht an manchen Stellen in die Membran des Endoplasmatischen Retikulums (ER) über.

- Im Inneren des Zellkerns befinden sich die linearen Chromosomen. Diese bilden meist ein watteartiges Gerüst; nur während der Zellteilung sind sie als individuelle Gestalten erkennbar, weil sie dann stark verkürzt und verdickt sind.*

* Der Begriff „Chromatin“ ist für unterrichtliche Zwecke völlig überflüssig, auch wenn er in den Lehrbüchern immer wieder auftaucht, und sollte weggelassen werden. Es genügt zu sagen, dass die Chromosomen entspiralisiert, also dünn und langgestreckt vorliegen.

1.4 Enzyme: Bau und Wirkungsweise

Die Enzyme bilden einen Schwerpunkt, der ziemlich viel Unterrichtszeit beansprucht. Zunächst sollte das Vorwissen der Kursteilnehmer zu Proteinen und Enzymen evaluiert werden, wenn das noch nicht geschehen ist (s. o. bei Abschnitt 0). Ergänzend kann das Vorwissen zur Verdauung und zur Diagrammkompetenz evaluiert werden.

Ich habe zusammen mit meinen Referendaren ein Lernprogramm entwickelt, das am Beispiel Enzymatik den Weg der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung aufzeigt und die dazu gehörigen prozessbezogenen Kompetenzen der Kursteilnehmer schult.

Hier sollte unbedingt ein zweistündiges Praktikum zur Enzymatik durchgeführt werden. Nach dem Motto „Man sieht, was man kennt“ ist es sinnvoll, zunächst die Theorie zu besprechen und das Praktikum erst danach durchzuführen; induktives Lernen würde hier zu viel Zeit beanspruchen.

1.4.1 Enzyme als Biokatalysatoren

Demonstrationsversuch zum Einstieg:

Ca. 5%ige Wasserstoffperoxid-Lösung wird mit Braunstein (MnO_2) bzw. mit frischen Kartoffelschnipseln (enthalten das Enzym Katalase) versetzt. In beiden Fällen ist eine intensive Gasbildung zu beobachten. Fakultativ: Gas auffangen und mit der Glimmspanprobe nachweisen, dass es sich um Sauerstoff handelt.

ALP Blatt 11_v05 (1. Auflage); 11_3_v01 (2. Auflage) zeigt zusätzliche Varianten davon wie z. B. Karotte, rote Paprika, Lauch, Zwiebel, Banane, Hackfleisch, Hefe

Reaktionsgleichung: $2 H_2O_2 \rightarrow 2 H_2O + O_2 \uparrow$

Bei Raumtemperatur benötigt die Zersetzung von Wasserstoffperoxid einen Katalysator. Ein Katalysator beschleunigt eine Reaktion, indem er die Aktivierungsenergie herabsetzt; er greift in die Reaktion ein, geht aber unverändert aus ihr hervor.

ggf. Vergleich anorganischer mit Biokatalysatoren:

Eigenschaft	anorganischer Katalysator	Biokatalysator (Enzym)
Arbeitstemperatur	auch hohe Temperaturen	meist nur bis 40 °C
Substrate*	meist viele	meist nur ein Substrat oder sehr eng verwandte Stoffe
Wirkung	katalysiert unterschiedliche Reaktionen gleichzeitig	katalysiert nur eine einzige Art von Reaktion
Regulierbarkeit	nicht regulierbar	meist sehr differenziert regulierbar
Beispiel für die Zersetzung von H_2O_2	Braunstein (MnO_2)	Katalase

* Das Edukt heißt in der Enzymatik: das Substrat.

Biokatalysatoren sind zwar sehr temperaturempfindlich, sind aber in ihrer Aktivität hochspezifisch und meist regulierbar. Enzyme sind Biokatalysatoren auf Proteinbasis (bestimmte Enzyme enthalten außer dem Proteinanteil weitere Moleküle*).

* *Die Unterscheidung zwischen Protein und Proteid weglassen!*

Fakultativ: Ribozyme sind Biokatalysatoren auf RNA-Basis.

Nomenklatur:

Enzym-Namen enden auf das Suffix -ase (z. B. Amylase, Katalase, Urease).

Zusätzlich können Sie Ausnahmen erwähnen wie Pepsin bzw. weitere Bestandteile von Enzym-Namen erklären wie den Namen des Substrats bzw. des katalysierten Reaktionstyps. Aber Sie sollten auf keinen Fall verlangen, dass sich die Schüler hierüber Kenntnisse aneignen; also keine Diskussion von Bezeichnungen wie „Pyruvatdehydrogenase“ oder „Phosphofruktokinase“!

Energiediagramm einer Reaktion mit und ohne Katalysator zur Wiederholung (NTG: 8. Klasse; andere Schulzweige: 9. Klasse Chemie)

1.4.2 Spezifität von Enzymen

a) Substratspezifität:

Im Gegensatz zu anorganischen Katalysatoren besitzen Biokatalysatoren eine hohe Substratspezifität.

absolute Substratspezifität: Das Enzym bindet ausschließlich 1 Substrat; Beispiel: Urease bindet nur Harnstoff (englisch: *urea*), nicht Thioharnstoff, nicht N-Methyl-Harnstoff.

Versuch: Lösungen von Harnstoff, Thioharnstoff bzw. N-Methyl-Harnstoff werden mit stark verdünnter Phenolphthalein-Lösung und Urease-Lösung versetzt. Nach wenigen Minuten färbt sich der Ansatz mit Harnstoff pink, weil eine basische Lösung entsteht, während die beiden anderen Ansätze (fast) farblos bleiben.

Anleitung, Formeln, Erklärungen, Tipps bei ALP Blatt 11_v18

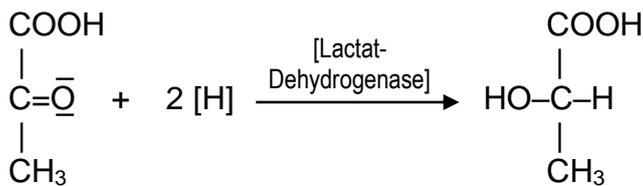
relative Substratspezifität: Das Enzym bindet alle Substrate, die eine spezifische funktionelle Gruppe besitzen; Beispiele: α -Amylase spaltet α -1,4-Bindungen in Stärke-Molekülen (aber nicht die α -1,6-Bindungen des Amylopektins, nicht die β -1,4-Bindungen der Zellulose) unabhängig von der Moleküllänge; das Magen-Enzym Pepsin spaltet Peptidbindungen in Protein-Molekülen, weitgehend unabhängig von der Art des Proteins; Lipase spaltet die Esterbindungen in Fett-Molekülen unabhängig von der Länge der Fettsäurereste.

b) Wirkungsspezifität:

Im Gegensatz zu anorganischen Katalysatoren, die meist Produktgemische erzeugen, besitzen Biokatalysatoren eine hohe Wirkungsspezifität. Von einer Vielzahl möglicher Reaktionen, die ein Substrat durchführen kann, wird nur eine einzige verwirklicht (z. B. entsteht bei optisch aktiven Produkten jeweils nur das eine Enantiomer, nicht das andere).

Beispiel: Im abbauenden Stoffwechsel wird Brenztraubensäure (bzw. dessen deprotonierte Form Pyruvat) von unterschiedlichen Enzymen zu unterschiedlichen Produkten umgesetzt:

► Milchsäuregärung im menschlichen Muskel bzw. in Milchsäurebakterien; Enzym Lactat-Dehydrogenase (ein Enzym, das von Milchsäure/Lactat zwei Wasserstoffatome abspalten bzw. die umgekehrte Reaktion durchführen kann):

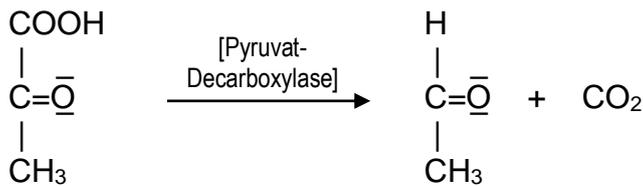


Brenztraubensäure

Milchsäure

[H] bedeutet 1 Wasserstoff-Ion plus ein Elektron

► Alkoholische Gärung in Hefezellen; Enzym Pyruvat-Decarboxylase (ein Enzym, das von Milchsäure/Pyruvat ein Molekül Kohlenstoffdioxid abspaltet; dabei entsteht der hochgiftige Acetaldehyd, der im nächsten Schritt zu Ethanol reduziert wird):

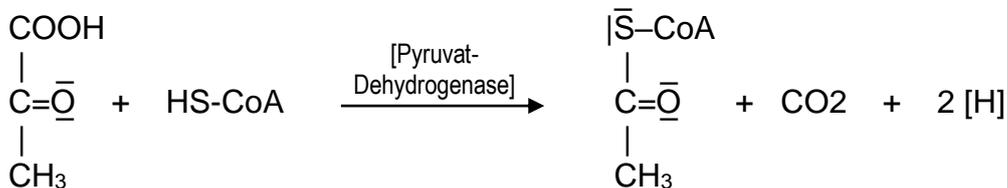


Brenztraubensäure

Acetaldehyd

► Zellatmung (präzise: der Teilschritt der Oxidativen Decarboxylierung; *das ist aber kein Lernstoff im G8!*)

Enzym: Pyruvat-Dehydrogenase (ein Enzym*, das mit Hilfe der Coenzyme Thiaminpyrophosphat und Liponamid in drei Schritten ein Molekül Coenzym A, abgekürzt HS-CoA, an das Substrat anhängt, wobei 2 [H] vom Substrat auf das Liponamid übertragen werden und von dort letztlich auf NAD⁺):



Brenztraubensäure

Acetyl-CoA

* Streng genommen wird der dritte Schritt durch das Enzym Dihydrolipoyl-Dehydrogenase katalysiert.

Hinweis: Diese Darstellungen dienen ausschließlich der Demonstration der Wirkungsspezifität und stellen keinen Lernstoff dar. Die Schüler sollen lediglich an konkreten Beispielen (auf die später zurückgegriffen wird, wenn auch nicht in dieser Detailtreue) diesen Effekt vorgestellt bekommen. Sie können auch ermitteln, von welchen Stellen die Wasserstoff-Atome abgespalten werden.

Die Wirkungsspezifität lässt in der Schule experimentell nicht darstellen.

Ergebnis: Jedes Enzym sucht sich aus dem Stoffgemisch in der Zelle sein Substrat heraus und wandelt es in der ihm eigenen Weise in ein Produkt um.

1.4.3 Wirkungsweise von Enzymen

Das Thema „Reaktionsgeschwindigkeit und Enzymkatalyse“ steht im Chemiekurs erst am Ende der 11. Jahrgangsstufe und ist den Schülern deshalb noch nicht bekannt. In der 10. Klasse wurde die Bedeutung der Enzyme beim Abbau der Nährstoffe thematisiert, aber in der Regel, ohne dabei auf die Wirkungsweise der Enzyme einzugehen.

Abfolge der Einzelschritte:

- Das Substrat-Molekül wird von der Erkennungs-Stelle des Enzym-Moleküls erkannt an seiner räumlichen Struktur und an seinem Ladungsmuster (Schlüssel-Schloss-Prinzip).
- Das Substrat-Molekül wird von der Bindungs-Stelle des Enzym-Moleküls (meist identisch mit der Erkennungs-Stelle) gebunden (oft über Wasserstoffbrücken).
- Das aktive Zentrum des Enzyms, bestehend aus meist 1-3 besonders platzierten Aminosäureresten, reagiert mit dem Substrat-Molekül und verändert es in spezifischer Weise.
- Das daraus entstehende Produkt-Molekül passt aufgrund seiner veränderten Struktur nicht mehr in die Erkennungs-und-Bindungs-Stelle und löst sich vom Enzym-Molekül (Freisetzung des Produkt-Moleküls).

Entwicklung eines Tafelbilds mit einer Serie von Skizzen mit folgenden Elementen:

Bild 1:

- Enzym-Molekül mit Erkennungs-und-Bindungs-Region sowie aktivem Zentrum, das katalytisch wirkt (in der Regel 1-3 Aminosäurereste)
- Substrat-Molekül, das genau in die Erkennungs-und-Bindungs-Region passt (Schlüssel-Schloss-Prinzip)
- Molekül, das aufgrund seiner Form nicht in die Erkennungs-und-Bindungs-Region passt
- ✓ Substrat-Spezifität: Nur ein Substrat mit passender Struktur kann an das Enzym andocken.

Bild 2:

- Enzym-Substrat-Komplex
- ✓ Das aktive Zentrum verändert sich kurzzeitig, wodurch am Substrat eine chemische Veränderung verursacht wird: Das Substrat wird umgesetzt.

Bild 3:

- Enzym-Molekül (Aussehen identisch wie in Bild 1)
- hergestellte Produkte
- von diesem Enzym nicht hergestellte Produkte
- ✓ Wirkungsspezifität: Das Enzym katalysiert nur eine spezielle Reaktion, nicht mehrere.

Vergleiche dazu die Abbildung im ISB-Skript auf Seite 6 oben.

Hinweis: Das Suffix „-Molekül“ sollte nicht weggelassen werden, um eindeutig darzustellen, dass das Modell die Teilchen-Ebene (submikroskopische Ebene) betrifft.

Die Schüler sollen wissen, dass sie in der Darstellung der Wirkungsweise von Enzymen ein nicht passendes Substrat bzw. nicht aufscheinende Produkte nicht berücksichtigen müssen (vgl. Abituraufgaben).

Hier bietet sich Modellkritik an:

- Die Darstellung ist nur 2-dimensional, während die differenzierte Oberfläche eines Enzyms bzw. Substrats im Raum gekrümmt ist.
- Das Schlüssel-Schloss-Prinzip bezieht sich beim Enzym-Substrat-Komplex nicht nur auf die geometrische Form, sondern auch auf das Ladungsmuster (negative und positive Ladungen bzw. Partiaalladungen stehen sich gegenüber).
- Die Reaktion erfolgt aufgrund einer zwischenzeitlichen Veränderung der Tertiärstruktur im Enzym, was hier nicht dargestellt ist.

1.5 Einflüsse auf die Enzymaktivität

1.5.1 Messung der Enzymaktivität EA

Bevor auf die einzelnen Faktoren eingegangen wird, welche die Enzymaktivität beeinflussen, muss der Begriff Enzymaktivität klar gemacht und müssen Methoden zu ihrer Messung besprochen werden.

Das Thema „Reaktionsgeschwindigkeit und Enzymkatalyse“ steht im Chemiekurs erst am Ende der 11. Jahrgangsstufe und ist den Schülern deshalb noch nicht bekannt.

Definition:

Die Enzymaktivität EA entspricht der Reaktionsgeschwindigkeit, das ist der Stoffumsatz pro Zeiteinheit.

Messung:

Der Stoffumsatz kann durch die Abnahme der Menge an Substrat oder die Zunahme der Menge an Produkt erfasst werden.

- Die Menge gasförmiger Produkte wird erfasst, indem das Volumen des entstehenden Gases gemessen wird (nicht erfasst ist der Anteil an Gas, das sich im Wasser löst).
- Oft wird zur Visualisierung ein Indikator zugesetzt, der Edukt oder Produkt einfärbt.

Beispiele:

- Zersetzung von Wasserstoffperoxid durch Katalase: Volumen-Messung des entstehenden Sauerstoff-Gases
- Zerlegung von Stärke durch Amylase: Durch Zugabe von Iod-Lösung* färbt sich die Stärke-Lösung blau; mit fortschreitendem Abbau der Stärke verschwindet die blaue Farbe.
- Zerlegung von Harnstoff durch Urease: Die Harnstofflösung wird mit einem Säure-Base-Indikator (am besten Phenolphthalein) versetzt; als Produkte entstehen Kohlenstoffdioxid (sauer) und Ammoniak (basisch) im Verhältnis 1 zu 2, so dass die Produktlösung insgesamt basisch ist und ab einem pH-Wert von 8,2 pink erscheint.

** Auch in der Oberstufe genügt der Ausdruck „Iod-Lösung“ (ich sehe keinen Zugewinn für den Schüler bei Begriffen wie „Iod-Kaliumiodid-Lösung“ oder „Lugol'sche Lösung“; das ist nur name dropping ohne tieferes Verständnis).*

Hinweis: Im Leitartikel des Kapitels „Enzyme“ im Praktikumsordner „Bio? – Logisch!“ wird für jedes dieser drei gängigen Enzyme die Visualisierung des Stoffumsatzes in einem eigenen Abschnitt genau beschrieben.

1.5.2 Substratkonzentration

Ein Diagramm wird vorgegeben, von den Schülern beschrieben und gemeinsam auf Teilchenebene erklärt. **Vergleiche dazu die Abbildung im ISB-Skript auf Seite 6 unten.**

Beschreibung:

- (1) starker Anstieg der EA bei niedrigen Substratkonzentrationen
- (2) geringer Anstieg der EA bei mittleren Substratkonzentrationen
- (3) konstante EA bei hohen Substratkonzentrationen

Diagrammtyp: Sättigungskurve

Hinweis: (Nicht nur) Schüler neigen dazu, die x-Achse automatisch als Zeitachse zu betrachten. Deshalb verwenden sie Ausdrücke wie „zuerst“, „dann“, „am Ende“. Dies ist aufmerksam zu beobachten und ggf. zu thematisieren und zu unterbinden.

Erklärung:

- (1) Die wenigen Substrat-Moleküle treffen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf unbesetzte Enzym-Moleküle. Je mehr Substrat-Moleküle vorliegen, desto mehr Enzym-Substrat-Komplexe bilden sich.
- (2) Ein beachtlicher Teil der Enzym-Moleküle liegt permanent als Enzym-Substrat-Komplex vor; bei konstanter Menge an Enzym-Molekülen insgesamt sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Substrat-Moleküle und unbesetzte Enzym-Moleküle aufeinander treffen.
- (3) Alle Enzym-Moleküle sind mit Substrat-Molekülen besetzt. Auch durch eine Erhöhung der Substrat-Konzentration können nicht noch mehr Enzym-Substrat-Komplexe gebildet werden; die maximale Enzymaktivität (v_{\max}) ist erreicht.

Versuche dazu im Schülerpraktikum am Ende: vgl. 1.6

1.5.3 Temperatur

Beispielsweise wird eine Wertetabelle vorgegeben, in der die EA bei mehreren Temperaturen zwischen 5 °C und 40 °C angegeben ist. Die Schüler sollen Hypothesen entwerfen, wie hoch die EA bei höheren Temperaturen ausfallen würde. Dann wird ein (klassisches) Diagramm der Temperatur-Abhängigkeit der EA vorgegeben, von den Schülern beschrieben und gemeinsam auf Teilchenebene erklärt. **Vergleiche dazu die Abbildung im ISB-Skript auf Seite 7 unten.**

Beschreibung:

- (1) Exponentieller Anstieg der EA bei Temperaturen bis (je nach Graph) etwa 35 °C
- (2) maximale EA bei (je nach Graph) etwa 40 °C
- (3) starker Abfall der EA zwischen (je nach Graph) 40 °C und 50 °C.

Diagrammtyp: Optimumkurve

Erklärung:

- (A) Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel (RGT-Regel) der Temperatur-Abhängigkeit chemischer Reaktionen: Bei einer Temperatur-Erhöhung um 10 °C steigt die Reaktionsgeschwindigkeit auf das Doppelte bis Dreifache, weil sich bei höherer Temperatur die Teilchen schneller bewegen und damit die Wahrscheinlichkeit steigt, dass Substrat-Molekül und Enzym-Molekül aufeinander treffen. Dies erklärt den exponentiellen Anstieg bei (1).
- (B) Hitzedenaturierung: Mit steigender Temperatur steigt der Anteil an denaturierten (irreversibel veränderten) Enzym-Moleküle. Dieser Effekt wird ab etwa 30 °C relevant. Dies erklärt das Optimum (2) sowie den starken Abfall (3).

Versuche dazu im Schülerpraktikum am Ende: vgl. 1.6

1.5.4 Regulation durch Hemmstoffe

Im Gegensatz zu anorganischen Katalysatoren ist die Aktivität bei vielen Enzymen regelbar. Wenn sich ein Hemmstoff-Molekül an ein Enzym-Molekül anlagert, wird dadurch dessen katalytische Aktivität ausgeschaltet. Die Bindung des Hemmstoff-Moleküls an das Enzym-Molekül ist reversibel, d. h. dass sich das Hemmstoff-Molekül nach einiger Zeit wieder ablöst, so dass das nun wieder freie Enzym-Molekül ein Substrat-Molekül binden und umsetzen kann.

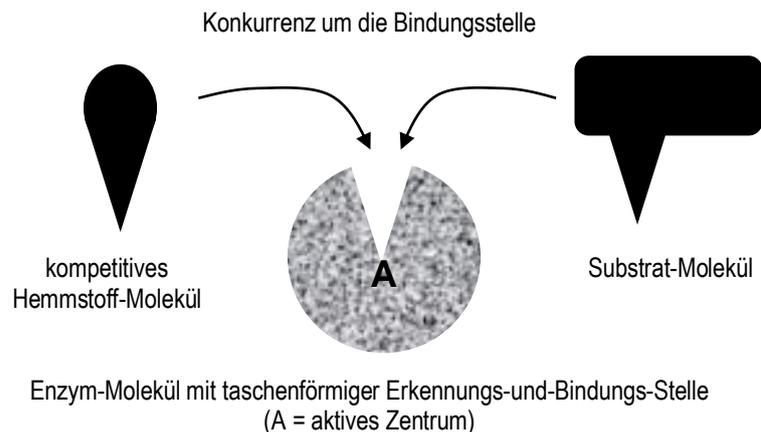
Hinweis: Das chemische Gleichgewicht der Hin- und Rückreaktion steht im Chemiekurs erst am Anfang der 12. Jahrgangsstufe und ist den Schülern deshalb noch nicht bekannt.

a) Kompetitive Hemmung: Wettbewerb

competere, lateinisch: streben, kämpfen, zusammen etwas begehren; im modernen Sinn: konkurrieren (vgl. englisch *compete*)

Das Hemmstoff-Molekül konkurriert mit dem Substrat-Molekül um die selbe Bindungsstelle des Enzym-Moleküls (die das aktive Zentrum enthält). Im Gegensatz zum Substrat wird der kompetitive Hemmstoff nicht umgesetzt, sondern bleibt unverändert und löst sich nach einiger Zeit wieder vom Enzym.

Der kompetitive Hemmstoff besitzt eine große strukturelle Ähnlichkeit mit dem Substrat (zumindest in dem Bereich, der in der Bindungsstelle andockt). Dies lässt sich im Vergleich der Strukturformeln von Substrat und Hemmstoff erkennen.



Das Diagramm mit den Graphen einer nicht gehemmten und einer kompetitiv gehemmten enzymatischen Reaktion bei konstanter Menge an Hemmstoff in Abhängigkeit von der Substratkonzentration wird vorgegeben oder erarbeitet. **Vergleiche dazu die Abbildung im ISB-Skript auf Seite 7 oben.**

Beschreibung des Graphen: Die Kurve verläuft ähnlich wie bei der ungehemmten Reaktion, aber unterhalb von dieser. Bei geringer und mittlerer Substratkonzentration ist der Unterschied deutlich, bei hoher Substratkonzentration nähert sich die Kurve der kompetitiv gehemmten Reaktion asymptotisch dem Maximalwert der Enzymaktivität v_{\max} .

Erklärung: Bei konstanter Menge an Hemmstoff-Molekülen „gewinnen“ die Substrat-Moleküle umso häufiger den Wettbewerb um die Bindungsstelle, je höher ihre Konzentration ist. Deshalb spielt bei sehr hoher Substratkonzentration die vergleichsweise sehr geringe Menge an Hemmstoff keine Rolle.

Hinweise: Mehr Lerninhalt sollte an dieser Stelle nicht geboten werden. Vertiefte Behandlung wie die doppelt reziproke Auftragung von Substratkonzentration und EA ($1/c_{\text{Substrat}}$ und $1/v$) zur graphischen Ermittlung der Michael-Menten-Konstante waren Stoff im ehemaligen Leistungskurs und haben keinen Platz mehr im G8. Überlasten Sie die Schüler nicht mit Lernstoff, der nicht vom G8-Lehrplan verlangt wird!

Versuch dazu (als Demonstrations-Experiment oder bei 1.6 als Schülerexperiment): kompetitive Hemmung von Urease durch Thioharnstoff; ALP Blatt 11_v19 (1. Auflage); 11_4_v03 (2. Auflage)

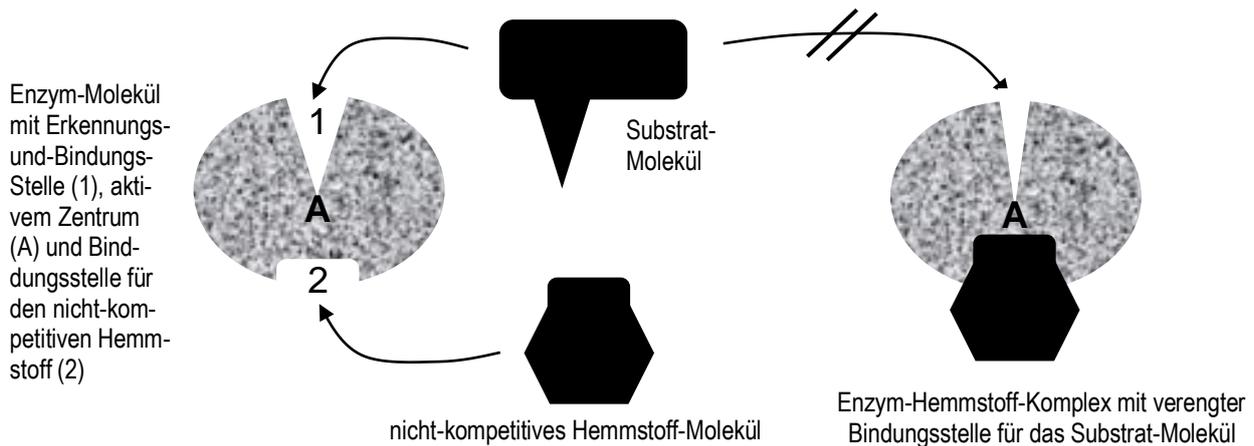
b) nicht-kompetitive Hemmung („allosterische Hemmung“): räumliche Veränderung

Im G8-Lehrplan steht die Formulierung „allosterische Hemmung“, der aber wissenschaftlich nicht genau beschreibt, was gemeint ist. Deshalb sollte er konkretisiert werden zu „nicht-kompetitive Hemmung“ (der Lehrplan-Begriff sollte trotzdem zusätzlich genannt werden, weil nicht auszuschließen ist, dass er im Abitur verwendet wird).

allos, griechisch: anders; *steros*, griechisch: Ort

Bei nicht-kompetitiver Hemmung besitzt das Enzym-Molekül außer der Erkennungs- und Bindungs-Stelle mit dem aktiven Zentrum eine zweite Bindungsstelle für den nicht-kompetitiven Hemmstoff. Sobald das Hemmstoff-Molekül am Enzym-Molekül andockt, wird dadurch die räumliche Struktur des Enzym-Moleküls dergestalt verändert, dass das Substrat-Molekül nicht mehr in seine Bindungsstelle passt und deshalb nicht umgesetzt werden kann. Wenn sich das Hemmstoff-Molekül wieder vom Enzym-Molekül ablöst, erhält dies sein ursprüngliche Form wieder, so dass ein Substrat-Molekül andocken kann.

Der nicht-kompetitive Hemmstoff besitzt keine strukturelle Ähnlichkeit mit dem Substrat. Dies lässt sich im Vergleich der Strukturformeln von Substrat und Hemmstoff erkennen.



Das Diagramm mit den Graphen einer nicht gehemmten und einer nicht-kompetitiv gehemmten enzymatischen Reaktion bei konstanter Menge an Hemmstoff in Abhängigkeit von der Substratkonzentration wird vorgegeben. **Vergleiche dazu die Abbildung im ISB-Skript auf Seite 7 oben.**

Beschreibung des Graphen: Die Kurve verläuft ähnlich wie bei der ungehemmten Reaktion, aber unterhalb von dieser. Bei hoher Substratkonzentration wird ein Maximalwert der Enzymaktivität erreicht, der unter v_{\max} der ungehemmten Reaktion liegt.

Erklärung: Bei konstanter Menge an Hemmstoff-Molekülen ist stets eine konstante Menge an Enzym-Molekülen blockiert. Erhöhung der Substrat-Konzentration hat keinen Einfluss auf die Menge der für die Reaktion verfügbaren Enzym-Moleküle. Die durch den Hemmstoff permanent verringerte Menge an Enzym-Molekülen bedingt einen geringeren Wert der maximalen Enzymaktivität.

Zweck: Stoffaufbau und -abbau in der Zelle erfolgt in der Regel über Reaktionsketten, an denen hintereinander mehrere Enzyme beteiligt sind. Oft stellt das Endprodukt den nicht-kompetitiven Hemmstoff für das System des ersten Reaktionsschritts dar (Endprodukt-Hemmung). Dadurch wird ein Regelkreis gebildet, der dafür sorgt, dass bei genügend hoher Konzentration des Endprodukts die Reaktionskette blockiert wird und erst wieder anläuft, wenn die Konzentration des Endprodukts deutlich absinkt.

Beispiel: Der Abbau der Glucose –sowohl in der Gärung als auch in der Zellatmung– dient der Bereitstellung von ATP, dem universellen Kurzzeit-Energiespeicher der Zelle. Der erste Abschnitt des Glucose-Abbaus ist in allen Fällen die Glycolyse (*die wird aber erst später im Kapitel 1.3 behandelt*). Die Reaktionsgeschwindigkeit des Abbaus wird vom zweiten Reaktionsschritt bestimmt, der vom Enzym Phosphofruktokinase (PFK) katalysiert wird (dabei wird auf Glucosephosphat eine zweite Phosphatgruppe angebracht). ATP (das wesentliche Endprodukt dieser Reaktionsketten) wirkt als nicht-kompetitiver Hemmstoff auf PFK.

Hinweis: Gärung und Zellatmung sind aus der 8. Klasse bekannt („Ernährung und Stoffwechselformen“ bei Bakterien), der oxidative Abbau von Glucose auch aus der 10. Klasse („Reaktion von Sauerstoff mit Glucose: Oxidation in den Mitochondrien“) und ATP ebenfalls aus der 10. Klasse („ATP als mobiler und universeller Energieträger“).

Hinweis: Dieses Beispiel ist natürlich kein Lernstoff, vor allem nicht vor der Besprechung der Glycolyse!

ALP Blatt 11_v28 (1. Auflage); 11_5_v07 (2. Auflage) zeigt ein einfaches, aber eindrucksvolles **Schwamm-Modell** für die nicht-kompetitive Hemmung.

ALP Blatt 11_v16 (1. Auflage); 11_3_v12 (2. Auflage) beschreibt einen **Versuch** zur nicht-kompetitiven Hemmung von Katalase durch Ammoniumbenzoat. (Der Hemmstoff steht in kaum einem Schullabor auf und muss unter pH-Kontrolle mit einigem Aufwand selbst hergestellt werden. Wenn keine reine Katalase zur Verfügung steht, muss mit Kartoffelpresssaft gearbeitet werden, weil das Benzoat in Kartoffel-Raspel bzw. Hefezellen nicht schnell genug eindringt.)

Hinweis: Weitere Arten der Hemmung führt der G8-Lehrplan nicht auf. Deshalb sollten Effekte wie Substratüberschuss-Hemmung, reversible Denaturierung durch Alkohol, irreversible Denaturierung durch Erhitzen oder Schwermetall-Ionen nicht behandelt werden. Der Praktikums-Ordner „Bio? – Logisch!“ führt sie deshalb auf, weil sie in einem entsprechenden W-Seminar Anwendung finden können.

1.6 Enzym-Praktikum (und Kompetenz-Training)

Lehrer: „Wie misst man die Abhängigkeit der Amylase-Aktivität von der Temperatur?“
Schüler: „Man gibt Stärke-Lösung, Iod-Lösung und Amylase-Lösung in ein Glas, stellt es auf eine Heizplatte und dreht die Temperatur mit der Zeit immer höher.“
Lehrer: „Und wie misst man dabei die Amylase-Aktivität?“
Schüler: „Man legt immer wieder eine Probe unters Mikroskop und schaut, wie schnell die Amylase jeweils arbeitet.“

Das ist ein Ausschnitt (nicht vollständig wörtlich, aber sinngemäß) aus einem Abitur-Colloquium mit dem Prüfungsschwerpunkt Cytologie und Enzymatik.

Der im Kasten dargestellt Prüfungsdialog war für mich der Anlass, zusammen mit meinen Ausbildungs-Seminaren ein Programm zum Kompetenz-Training beim Thema Enzyme zu entwerfen.

Weil weder der Weg der Erkenntnisgewinnung noch die Enzymatik triviale Themen sind, halte ich es für sehr effektiv, wenn dieses Trainings-Programm bereits in der 10. Klasse begonnen wird und zwar am Beispiel der Verdauungs-Enzyme, um in Q11 vertieft zu werden. Wenn die Kursteilnehmer in der 10. Klasse nichts oder nur wenig in dieser Hinsicht gelernt haben, muss in Q11 mehr Zeit dafür veranschlagt werden.

*Der Prüfungsdialog zeigt zwei typische Schülerfehler auf: untauglicher Versuchsaufbau und untaugliche Messmethode. Das beste Mittel dagegen ist einerseits eine gute theoretische Durchdringung (das entspricht Abschnitt 1.5) und mindestens zwei Stunden Schülerpraktikum (die Einzelstunde, die im ISB-Skript auf Seite 3 dafür veranschlagt wird, ist definitiv zu wenig). In meinem Leitartikel zum Kapitel „Enzyme“ im **Praktikumsordner** „Bio? – Logisch!“ wird das Prinzip einer differenzierten Vorgehensweise in sieben Schritten dargestellt, die das theoretische Wissen zur Enzymatik voraussetzt:*

- 1 Art der katalysierten Reaktion: Die Amylase-Reaktion kennen die Schüler aus der 10. Klasse; die Urease- und Katalase-Reaktion kommen im theoretischen Teil (1.5) vor.
- 2 Messung der Enzymaktivität: wurde bereits in 1.5.1 behandelt

- 3 Formulieren einer Fragestellung bzw. Hypothese
- 4 Entwurf eines Versuchsaufbaus: *sollte in mindestens einem Fall durch die Schüler selbst erfolgen*
- 5 Durchführung der Versuche: *am besten arbeitsteilig, um mehr Messwerte zu generieren*
- 6 Auswertung der Versuche: *Hierbei sollte nicht zu viel an Vorwissen einfach vor- ausgesetzt werden, sondern intensives Training von Diagramm-Kompetenz betrieben werden.*
- 7 Kritische Betrachtung unter Rückbezug auf die Hypothese bzw. Fragestellung

*Im **Praktikumsordner** sind sowohl im Leitartikel als auch auf den einzelnen Blättern zum Kapitel „Enzyme“ die jeweiligen Versuchsaufbauten und Messmethoden sehr genau beschrieben. Es wird dabei eine große Bandbreite für den Anspruch an die Auswertung aufgezeigt: von einfachen Ja-Nein-Entscheidungen bei qualitativen Versuchen über die Erstellung von Wertetabellen aus einfachen halbquantitativen und quantitativen Messungen bis hin zu sehr aufwendigen quantitativen Versuchen mit graphischer Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeit bei verschiedenen Werten der unabhängigen Variable. So können Sie die Versuche gemäß der Leistungsfähigkeit Ihres Kurses gezielt auswählen.*

*Auf meiner **Webseite** finden Sie unter „Materialien Oberstufe G8 > Strukturelle und energetische Grundlagen des Lebens > Organisation und Funktion der Zelle“ folgende Materialien:*

- *Im Skript „**Lernprogramm** Enzyme in Jgst. 10 und 11“ werden typische Fehler von Schülern sowie ein Trainings-Programm zu den prozessbezogenen Kompetenzen Erkenntnisgewinnung (Planung, Durchführung und Auswertung von Enzymversuchen) und Kommunikation (Diagramme) dargestellt.*
- *Direkt unter diesem Skript finden Sie Arbeitsblätter zur Evaluation von Vorwissen und zum Kompetenz-Training.*

Jeder Kurs ist anders. Stellen Sie deshalb aufgrund der Ergebnisse Ihrer Evaluation ein auf Ihren Kurs angepasstes Enzym-Praktikum und Kompetenz-Training zusammen. Veranschlagen Sie dafür zwischen 2 und 4 Unterrichtsstunden. Der Zeitaufwand lohnt sich, denn gerade am Beispiel der Enzymatik lässt sich der Weg der Erkenntnisgewinnung in der Oberstufe besonders gut darstellen bzw. erlernen.

Orientieren Sie sich bei der Auswahl der Experimente am Kapitel 11 im Praktikumsordner „Bio? – Logisch!“, Akademiebericht 506. Bei keinem anderen Kapitel dieses Ordners hat die einjährige Erprobungsphase größere Veränderungen notwendig gemacht als bei den Enzymen. Ich habe alle dort aufgeführten Experimente persönlich durchgeführt und auf ihre Machbarkeit überprüft (ich stufe mich selbst als einen eher mittelmäßigen Experimentator ein, so dass gewährleistet ist, dass dabei keine zu hohen Ansprüche an die Lehrkraft gestellt werden). Alle in diesem Abschnitt abgedruckten Tabellenwerte stellen echte Messergebnisse dar. Zur Schulung der Diagrammkompetenz können neben selbst erhobenen Werten auch diese Tabellen verwendet werden. Der ziemlich lange Leitartikel zu Kapitel 11 macht einerseits eine klare Systematisierung für den Weg der Erkenntnisgewinnung klar und erklärt andererseits Lehrkräften, die nicht Chemie studiert haben, Gepflogenheiten und Tricks aus dem Labor. Außerdem wird dargestellt, welche Enzymversuche unter den Bedingungen der Schule nicht oder nicht gut laufen und warum.

Achten Sie bei den Versuchen streng darauf, dass stets alle Versuchsbedingungen gleich sind – außer einer einzigen Variablen – und dass stets ein Blindversuch ohne Enzym mitläuft.

Unter der Überschrift 1.6 Enzym-Praktikum protokollieren die Kursteilnehmer ihre Experimente.

Die Abschnitte „Energiebindung und Stoffaufbau durch Photosynthese“ und „Grundprinzipien der Energiefreisetzung durch Stoffabbau“ werden in einem eigenen Skript behandelt.