Die Bedeutung von Enzymen im Alltag unter besonderer Berücksichtigung des kompetenzorientierten Unterrichts an einer BHS

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades einer Magistra der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Angelika MANDL

Am Institut für Chemie

Begutachterin: Dr. Helga Voglhuber

Graz, 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Graz, am ....

(Unterschrift)

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei meiner Betreuerin, Frau Dr. Helga Voglhuber, die mir ständig mit fachlichen Ratschlägen zur Seite gestanden ist und ein sehr gutes Arbeitsklima ermöglicht hat.
Der HLW Deutschlandsberg gilt ein großer Dank für die Ermöglichung der Durchführung der für diese Arbeit nötigen Experimente und die wertvollen Informationen in diesem Zusammenhang.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, die mir neben der Ausbildungsmöglichkeit immer Halt geboten und mich in allen Lebenslagen unterstützt haben. Bei meiner Schwester Barbara möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mich auch während der stressigen Studienzeiten ertragen hat und mir immer zur Seite gestanden ist.

Wichtig ist mir auch der Dank an meinen Freundeskreis, der mir zur richtigen Zeit sowohl Ablenkung, als auch Rückhalt geboten hat.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Enzymologie im Zusammenhang mit kompetenzorientiertem Unterricht. Dabei wird der Frage nachgegangen, wie auf das Thema „Enzyme“ im Unterricht berufsbildender höherer Schulen (auch BHS) kompetenzorientiert eingegangen werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand dieses ausgewählten Beispiels zu zeigen, dass es auch an BHS, Schulen mit meist rarer naturwissenschaftlicher Ausstattung, möglich ist, einen kompetenzorientierten Chemieunterricht zu führen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Förderung experimenteller Kompetenzen, sowie auf die Entwicklung der Lesekompetenz gelegt.

Diese Fragestellung wird mithilfe entsprechender Fachliteratur und aktueller Ergebnisse verschiedener Testungen beantwortet. Zusätzlich werden sowohl geplante Unterrichtseinheiten, als auch verschiedene Möglichkeiten, Kompetenzen im Unterricht zum Thema „Enzyme“ zu fördern, vorgestellt. Um einen Einblick in den Unterricht einer BHS zu bekommen, wurden im Vorfeld Experimente zur Enzymologie mit Schülerinnen einer HLW (höhere Lehranstalt für wirtschaftliche Berufe) durchgeführt.

Diese Arbeit liefert das Ergebnis, dass sich kompetenzorientierter Unterricht besonders positiv auf den Lernerfolg der Schüler/innen auswirkt. Auch in einer BHS kann kompetenzorientierter Chemieunterricht problemlos geführt werden. Dazu muss allerdings auf Besonderheiten dieses Schultyps Rücksicht genommen werden. So sind z.B. nicht alle Experimente zur Enzymologie in einer BHS durchführbar, da unter anderem deren Schwierigkeitsgrad nicht mit dem Lehrplan korreliert, oder in den meisten BHS nicht genügend Materialien und Chemikalien vorhanden sind.

Alles in allem zeigt diese Arbeit, dass auch an einer BHS ein sehr komplexer und zielführender kompetenzorientierter Chemieunterricht möglich ist, wenn man die besonderen Komponenten dieses Schultyps beachtet. Dieses ausgewählte Beispiel dient somit als Anregung für Lehrpersonen an den BHS, experimentellen, kompetenzorientierten Chemieunterricht durchzuführen.

Abstract

My Diploma Thesis deals with the topic „Enzymology“ in connection with competence orientated teaching. The paper aims at answering the question how the topic “Enzymology” can be dealt with at vocational schools in Austria (BHS) with regard to competence orientated teaching. The aim of this Diploma Thesis is to show with selected examples that it is also possible to conduct competence orientated teaching in Chemistry at BHS’s, even though these schools have rare scientific equipment. Special emphasis will be on encouraging experimental competences as well as developing reading competences.

Special sources and recent results from various surveys are used to answer the research question. Furthermore, planned lessons as well as different possibilities for promoting competences with regard to the topic “Enzymology” are presented within the paper. In order to provide an insight into lessons at BHS’s, experiments have been conducted in advance with students from a HLW.

This paper provides the results of my research question that competence orientated teaching has a vastly positive influence on the learning success of students. Competence orientated teaching in Chemistry can also easily be done at BHS’s with regard to the characteristic features of this school type. However, not all experiments can be conducted at BHS’s, because, for instance, the level of difficulty does not cooperate with their curricular or the schools do not have enough equipment.

Summing up, my Diploma Thesis shows that complex and expedient competence orientated teaching in Chemistry will also be possible at BHS’s if the features of this school type are taken into account. This selected example is aimed at teachers at BHS’s to conduct experimental and competence orientated Chemistry lessons.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 10

2 GESCHICHTE DER ENZYMFORSCHUNG 12

2.1 URGESCHICHTE DER ENZYMFORSCHUNG 12
2.2 ENZYMOLOGIE DES 19. JAHRHUNDERTS 12
2.3 ENZYMOLOGIE DES 20. JAHRHUNDERTS 13
2.4 MODERNE ENZYMOLOGIE 14

3 ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN VON ENZYMEN 15

3.1 HOHE REAKTIONSGESCHWINDIGKEITEN 15
3.2 MILDE REAKTIONSBEDINGUNGEN 16
3.3 STARK AUSGEPRÄGTE REAKTIONSSPEZIFITÄT 16

4 NOMENKLATUR UND KLASSIFIZIERUNG VON ENZYMEN 18

4.1 ISOENZYME 19

5 DIE SECHS ENZYMKLASSEN 19

5.1 1.KLASSE: OXIDOREDUKTASEN 19
5.2 2.KLASSE: TRANSFERASEN 20
5.3 3.KLASSE: HYDROLASEN 21
5.4 4.KLASSE: LYASEN 22
5.5 5.KLASSE: ISOMERASEN 23
5.6 6.KLASSE: LIGASEN 23

6 CHEMISCHER AUFBAU VON ENZYMEN 25

6.1 ENZYME SIND PROTEINE 25
6.2 VIER EBENEN DER ENZYMSTRUKTUR 27
6.2.1 Primärstruktur 27
6.2.2 Sekundärstruktur 27
6.2.3 Tertiärstruktur 28
6.2.4 Quartärstruktur 29
6.3 DAS AKTIVE ZENTRUM 29
6.4 COFAKTOREN 30
6.5 COENZYME 31
6.5.1 Nicotinamiddinucleotide 31

6.6 Prosthetische Gruppen 32

7 VERLAUF ENZYMATISCHER REAKTIONEN 33

7.1 Theorie des Übergangszustandes 33

7.2 Die Funktionsweise von Enzymen 35

8 MECHANISMUS ENZYMATISCHER REAKTIONEN 37

8.1 Säure-Base-Katalyse 38

8.2 Kovalente Katalyse 38

8.3 Metallionenkatalyse 39

9 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ENZYMAKTIVITÄT 40

9.1 Enzymaktivität 40

9.2 Abhängigkeit der Enzymaktivität vom pH-Wert 41

9.3 Abhängigkeit der Enzymaktivität von der Temperatur 42

10 KINETIK ENZYMATISCHER REAKTIONEN 43

10.1 Bedeutung der Michaelis-Konstanten KM 45

10.2 Sigmoide Reaktionskinetik 48

11 REGULATION DER ENZYMAKTIVITÄT 49

11.1 Regulation der Verfügbarkeit von Enzymen 49

11.2 Regulation der Enzymaktivität mittels Inhibitoren 50

11.2.1 Kompetitive Hemmung der Enzymaktivität 50

11.2.2 Unkompetitive Hemmung der Enzymaktivität 52

11.2.3 Nichtkompetitive Hemmung der Enzymaktivität 54

11.3 Allosterische Regulation der Enzymaktivität 56

11.4 Kovalente Modifikation zur Regulation der Enzymaktivität 57

12 EINSATZ VON ENZYMEN IM ALLTAG 58

12.1 Vorteile des Einsatzes von Enzymen 58

12.2 Gewinnung von Enzymen 59

12.3 Einsatz von Enzymen in der Medizin 60

12.4 Einsatz von Enzymen in der Lebensmitteltechnologie 62

12.5 Einsatz von Enzymen in Wasch-und Reinigungsmitteln 64

13 KOMPETENZMODELLE FÜR DEN NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHT 66

13.1 DEFINITION VON KOMPETENZEN 66
13.2 KOMPETENZEN IM NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHT 68
13.3 KOMPETENZMODELLE 69
13.3.1 Das österreichische Kompetenzmodell „Naturwissenschaften 8. Schulstufe“ .. 70
13.4 BILDUNGSSTANDARDS 71

14 MERKMALE KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHTS 72

15 ENTWICKLUNG KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHTS 74

16 METHODEN DES KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHTS 76

16.1 KOOPERATIVES LERNEN 76
16.2 PROJEKTUNTERRICHT 78

17 AUFGABENSTELLUNG IM KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHT .. 79

17.1 KONTEXT DER AUFGABENSTELLUNG 80
17.2 VIELFALT DER PROBLEMSTELLUNGEN 80
17.3 AUFGABEN IN VERSCHIEDENEN UNTERRICHTSPHASEN 80
17.4 INDIVIDUALISIERUNG 81
17.5 FÖRDERUNG VON KOMPETENZEN 81
17.6 KONZIPIERUNG VON KOMPETENZORIENTIERTEN AUFGABENSTELLUNGEN 81
17.7 BEISPIEL EINER NACH VORGESTELLTEM SCHEMA KONZIPIERTEN KOMPETENZORIENTIERTEN AUFGABENSTELLUNG 82

18 DAS EXPERIMENT IM KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHT 83

18.1 ALLGEMEINES ZUM EXPERIMENTIERUNTERRICHT 83
18.2 FÖRDERUNG VON KOMPETENZEN MITHILFE DES EXPERIMENTIERUNTERRICHTS 85
18.3 ENTWICKLUNGSMODELL EXPERIMENTELLER KOMPETENZEN 86
18.4 DAS EXKOMP-PROJEKT 88
18.5 DAS SPINNENMODELL EXPERIMENTELLER KOMPETENZEN 89

19 PLANUNG VON EXPERIMENTEN NACH DEM SPINNENMODELL 90

19.1 EXPERIMENT 1: HEMMUNG VON ENZYMEN DURCH SCHWERMETALLE 91
19.2 EXPERIMENT 2: ABHÄNGIGKEIT DER KATALASE-REAKTION VON DER TEMPERATUR . 93

20 LESEKOMPETENZ IM NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHT 95

20.1 FÖRDERUNG DER LESEKOMPETENZ IM NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHT ... 96
20.1.1 10 Lesestrategien im Unterrichtsgegenstand Chemie 96

20.2 Einsatz der Lesestrategien im Chemieunterricht zum Thema Enzyme 100
20.3 Einbindung der Lesestrategie „Text mit dem Bild lesen“ in den enzymatischen Unterricht 100
20.4 Einsatz von Illustrationen zum Thema Enzymklassen im Unterricht 101

21 EINGLIEDERUNG DES THEMAS „ENZYME“ IN DEN UNTERRICHT EINER BHS – AM BEISPIEL EINER HLW 103

21.1 Stundentafel einer HLW 103
21.2 Lehrplan des Unterrichtsgegenstandes Naturwissenschaften 104
21.3 Schulspezifische Fachschwerpunkte 105

22 EXPERIMENTE MIT ENZYMEN 107

22.1 Experimente mit Hydrolasen 107
22.2 Experimente mit Lyasen 130
22.3 Experimente mit Oxidoreduktasen 132

23 SCHLUSSFOLGERUNG 148

24 ANHANG 149

24.1 Illustrationen zu den sechs Enzymklassen 149
24.2 Erklärung der in Kapitel 22 verwendeten Gefahrenpiktogramme 151
24.3 H- und P- Sätze 152

25 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 154

26 TABELLENVERZEICHNIS 157

27 LITERATURVERZEICHNIS 158

28 LITERATURVERZEICHNIS ALPHABETISCH 166

29 WEBVERZEICHNIS 172

1 Einleitung

„The best way to learn is to do, to ask and to do. The best way to teach is to make students ask, and do. Don´t preach facts, stimulate acts“ (Mathematiker Paul Halmos [57, S. 466]).

Dieses Zitat des Mathematikers Halmos liefert die Kernaussage dieser Arbeit. Leider gibt es in Österreich noch viel zu viele Schulen, deren Unterricht dieser These noch nicht folgt. Häufig besteht der Unterricht, vor allem in den naturwissenschaftlichen Gegenständen, aus der Vermittlung reinen Faktenwissens und zählt somit zum als immer weniger zielbringend einzuschätzenden Frontalunterricht. Jedoch sollten gerade im naturwissenschaftlichen Unterricht das Experimentieren, sowie eigenständiges Denken und Handeln gefördert werden, um einen wünschenswerten Lernerfolg der Schüler/innen zu erzielen. Dies geschieht zum Teil bereits in allgemein bildenden höheren Schulen mit naturwissenschaftlichen Schwerpunkten oder einem naturwissenschaftlichen Wahlfachangebot. Indessen wird der naturwissenschaftliche Unterricht in berufsbildenden höheren Schulen leider häufig hintan gereiht, wodurch den Schüler/innen die Lernmotivation genommen wird und es in weiterer Folge zu keinem zielführenden Wissenserwerb kommen kann.

Um eine solche Lehr- und Lerneinstellung zu verändern und zu verbessern, wurde der kompetenzorientierte Unterricht eingeführt, mit diesem sich diese Arbeit beschäftigt.

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand des Themenkomplexes der Enzymologie aufzuzeigen, wie es auch in BHS - Schulen mit häufig geringer naturwissenschaftlicher Ausstattung – möglich ist, einen kompetenzorientierten Chemieunterricht abzuhalten. Außerdem wird in diesem Zusammenhang ein Überblick über den theoretischen Hintergrund der Enzymologie, sowie über den kompetenzorientierten Unterricht geliefert.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf den fachlichen Hintergrund der Enzymologie eingegangen, welcher das Fundament der weiteren Kapitel bildet. Der darauffolgende Abschnitt befasst sich mit dem kompetenzorientierten Unterricht und legt ein besonderes Augenmerk auf den Erwerb experimenteller Kompetenzen, sowie auf die Förderung der Lesekompetenz im Chemieunterricht. In diesem Zusammenhang wird bereits eine Verknüpfung zwischen Enzymologie und kompetenzorientiertem Unterricht erstellt. Dazu werden kompetenzorientiert geplante Experimente vorgestellt, sowie eine Möglichkeit der Förderung der Lesekompetenz im enzymatischen Unterricht dargestellt.

Der dritte und letzte Teil der Arbeit liefert ein Repertoire an Experimenten rund um das Thema Enzyme, die in berufsbildenden höheren Schulen auch ohne komplexe Materialien und ausgefallene Chemikalien, problemlos durchgeführt werden können. Diese Experimente können als Basiselement kompetenzorientierten Unterrichts an BHS dienen.

Anhand dieses ausgewählten Themengebietes wird somit dargestellt, wie kompetenzorientierter Chemieunterricht an berufsbildenden höheren Schulen gefördert werden kann. Dabei wird im Allgemeinen besonders auf das Miteinbeziehen von einfach durchführbaren Experimenten, sowie auf das Schaffen eines Alltagsbezuges geachtet.

2 Geschichte der Enzymforschung

2.1 Urgeschichte der Enzymforschung

Ohne von der Wirkungsweise, die Enzymen zugrunde liegt, Bescheid zu wissen, wurden diese schon vor einigen tausend Jahren von Menschen genützt, um unter anderem Sauerteig oder Bier herzustellen. Die alkoholische Gärung ist bereits seit dem Altertum bekannt, der Mechanismus dahinter wurde aber erst im 19. Jahrhundert aufgeklärt [1].

Erst mit dem Beginn der Enzymforschung, der Enzymologie, deren Wurzeln bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen, wurde Schritt für Schritt klar, welche wertvollen Eigenschaften Enzyme besitzen, und wo diese Verwendung finden. Die Enzymologie entwickelte sich aus Untersuchungen zur Fermentation und Verdauung und ist somit eng verknüpft mit der Analyse der alkoholischen Gärung [2, S.353f.].

Lazzaro Spallanzani, ein Priester und Naturforscher aus Padua, legte 1783 anhand eines Experiments mit Falken den Grundstein der Enzymologie. Er fütterte Falken mit durchlöcherten und mit Fleisch gefüllten Metallkapseln. Das ausgeschiedene Geröll der Falken zeigte leere Metallkapseln, was darauf schließen ließ, dass das Fleisch in den Kapseln mittels einer Substanz im Magensaft verdaut worden ist. Heute weiß man, dass es sich bei dieser Substanz um das im Magensaft enthaltene eiweißverdauende Enzym Pepsin handelt [3]. Obwohl durch dieses Experiment erstmals die Aktivität von Enzymen aufgezeigt worden ist, begann die Forschung an Enzymen erst im 19. Jahrhundert durch die Entdeckung der Gärungseigenschaften von Hefezellen.

2.2 Enzymologie des 19. Jahrhunderts

Der schwedische Chemiker Berzelius erkannt bereits 1820, dass Fermente, heute als Enzyme bezeichnet, in der Lage sind, chemische Reaktionen zu beschleunigen, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Er bezeichnete diese Fermente als biologische Katalysatoren [1]. 1836 stellten Berzelius und Liebig die von Gay-Lussac 1815 aufgestellte Brutto-Reaktionsgleichung der alkoholischen Gärung als einen katalytischen Prozess dar. Sie formulierten die Theorie, dass sich die Eiweißbestandteile der Hefe in der Zuckerlösung zersetzen und die Hefe somit zur Spaltung der Zuckermoleküle führt. Ein weiterer Schritt gelang dem französischen Chemiker Dubrunfaut im Jahr 1847, indem er den diastatischen Abbau von Stärke zu Maltose mittels eines wässrigen Auszuges von Gerstenmalz erklären konnte [4, S.2f.].

Louis Pasteur ging 1857 davon aus, dass nur lebende Hefezellen für die alkoholische Gärung verantwortlich seien. Er war der Überzeugung, dass die für das Leben relevanten Vorgänge an eine so genannte Lebenskraft gebunden sein müssten und demzufolge nur in lebenden Zellen ablaufen könnten. Somit war laut Pasteur die katalytische Wirkung von Fermenten rein auf lebende Zellen beschränkt. Zu dieser Zeit wurden zwei Arten von Fermenten unterschieden. Mikroskopisch sichtbare, an lebende Zellen gebundene Fermente, zu denen u.a. Bakterien und Hefen gezählt worden sind, wurden als geformte Fermente bezeichnet. Im Gegensatz dazu wurden lösliche, auch zellfrei wirksame Biokatalysatoren, als ungeformte Fermente bezeichnet. Namensgebend dafür war die Bezeichnung „Fermentum“ (lat. = Sauerteig) [4, S.2f.][5, S.66f.].

Friedrich Wilhelm Kühne führte 1876 den Begriff „Enzym“ ein und benannte damit diese ungeformten Fermente. Das Wort „Enzym“ lässt sich aus dem Griechischen herleiten („en“ = in; „zyme“ = Hefe, Sauerteig) und unterstreicht somit, dass eine Substanz in der Hefe, und nicht die Hefe selbst, Fermentationsprozesse beschleunigt [6, S.67].

1897 war es Eduard Buchner möglich, die unterschiedlichen Theorien zu Fermentation und Enzymen mithilfe eines Experiments zu erklären. Er zerstörte Hefezellen und kam zur Erkenntnis, dass auch der Hefepresssaft, der keine lebenden Hefezellen enthält, einen Fermentationsprozess vorantreiben kann. Man erkannte, dass Enzyme, unabhängig von jeglicher Zellstruktur, chemische Prozesse katalysieren können. Aufgrund der Theorie Buchners weiß man nun, dass sowohl die Gärung, als auch sämtliche andere biochemische Vorgänge von Enzymen beschleunigt werden und somit die Begriffe „Ferment“ und „Enzym“ gleichzusetzen sind. Heute wird üblicherweise der Begriff „Enzym“ verwendet [4, S.2f.].

2.3 Enzymologie des 20. Jahrhunderts

1913 gelang es Michaelis und Menten die Kinetik von Enzymen zu erklären und somit eine Gesetzmäßigkeit aufzustellen, nach derer die Geschwindigkeit enzymkatalysierter Reaktionen bestimmt werden kann [4, S.2f.]. Nach der Entdeckung Buchners bemühten sich viele Forscher darum, ein Enzym zu extrahieren und dieses in kristalliner Form darzustellen. Erst dem amerikanischen Biochemiker James B. Sumner ist dies im Jahr 1926 gelungen, als er das Enzym Urease aus Schwertbohnen isolierte. Außerdem hat Sumner bewiesen, dass es sich bei Enzymen um Proteine handelt.

Ein weiterer besonders wichtiger Punkt ist, dass es sich bei diesen Proteinen um die aktiv arbeitende Substanz des Biokatalysators handelt und diese nicht nur als dessen Träger fungieren. Sumners Theorie wurde von John H. Northrop bestätigt, dem es gelungen ist, die Enzyme Trypsin und Pepsin zu gewinnen.

Diese beiden Forscher erhielten aufgrund ihrer bedeutenden Erkenntnisse im Jahr 1946 gemeinsam den Nobelpreis für Chemie [1].

Nachdem es Hirs, Stein und Moore 1959 erstmals gelungen war, die genaue Struktur eines Enzyms, nämlich der Ribonuklease, zu entschlüsseln, war Merrifield 1969 erstmals fähig, diesen Biokatalysator mittels der nach ihm benannten Methode herzustellen [4, S.2f.].

2.4 Moderne Enzymologie

Derzeit liegt der Schwerpunkt der Enzymologie auf der ständigen Weiterentwicklung und Verbesserung von Enzymen, vor allem mittels gentechnischer Hilfsmittel. Mithilfe der Gentechnik ist es mittlerweile möglich, Enzyme maßzuschneidern, um diese u.a. in der Medizin, der Lebensmitteltechnologie oder in Waschmitteln einzusetzen. Es wird darauf gezielt, tolerantere Enzyme zu produzieren, die sowohl bei extremen Temperaturen, als auch bei niedrigen pH-Werten hocheffektiv arbeiten können. Somit finden Enzyme eine immer stärkere Anwendung in vielen verschiedenen Bereichen [7, S.76ff.].

3 Allgemeine Eigenschaften von Enzymen

Enzyme sind Katalysatoren biologischer Herkunft, so genannte Biokatalysatoren, die, ebenso wie Katalysatoren technischen Ursprungs, in Reaktionsmechanismen eingreifen und Reaktionen aufgrund der Herabsetzung der Aktivierungsenergie beschleunigen, ohne dabei selbst verbraucht zu werden [8, S.185].

Das zu diesem Kapitel passende Experiment „Wirkungsweise von Enzymen als Katalysatoren" ist in Kapitel 22.3 zu finden.

Sowohl endergonische, als auch exergonische Vorgänge können nicht spontan, allein nur mittels freier Energie ΔG ablaufen. Hierzu wird, egal um welche Reaktion es sich handelt, ein gewisses Maß an Aktivierungsenergie benötigt [9, S.236]. Würden exergonsiche Reaktionen prinzipiell spontan eintreten, hätte dies zur Folge, dass organische Moleküle aufgrund der Gleichgewichtseinstellung innerhalb kürzester Zeit in Kohlenstoffdioxid und Wasser zerfallen würden. Da es unter diesen Bedingungen kein Leben geben würde, sind organische Verbindungen in einem gewissen biologischen Temperaturbereich gegen Sauerstoff beständig [10, S.11]. Reaktionen müssen eingeleitet werden, indem die Reaktionspartner aktiviert werden. Ansonsten laufen die meisten biochemischen Reaktionen entweder gar nicht oder nur mit minimalster Geschwindigkeit ab. Biochemische Vorgänge in unseren Zellen müssen zeitlich geordnet, regulierbar und schnell verlaufen, um Leben zu gewährleisten. Aus diesem Grund befinden sich in einer Zelle mehrere 1000 Enzyme. Viele Zellen produzieren auch extrazellulär wirkende Enzyme. Diese Biokatalysatoren erniedrigen bei Bedarf die Aktivierungsenergie bestimmter, für sie spezifische, Reaktionen, und ermöglichen somit, dass biochemische Reaktionen bereits bei Körpertemperatur und neutralem pH-Wert mit hoher Geschwindigkeit ablaufen können [5, S.66ff.] [11, S.422].

Vergleicht man Enzyme mit herkömmlichen technischen Katalysatoren, so erkennt man anhand folgender Punkte die Vorzüge der Biokatalysatoren:

3.1 Hohe Reaktionsgeschwindigkeiten

Enzymatisch katalysierte Reaktionen laufen um ein 10^6 - 10^{12}-faches schneller ab, als die entsprechende nicht katalysierte Reaktion. Vergleicht man die Geschwindigkeiten einer enzymkatalysierten Reaktion mit einer mittels herkömmlichem Katalysator beschleunigten Reaktion, so wird man feststellen, dass letztere um mindestens eine Größenordnung langsamer verläuft [12, S.63].

3.2 Milde Reaktionsbedingungen

Enzyme arbeiten bereits bei Temperaturen unter 100°C, atmosphärischem Druck und neutralen pH-Werten mit einer sehr hohen Effizienz. Da es sich bei Enzymen um Proteine handelt, würden diese bei extremen Bedingungen denaturieren und somit ihre Wirksamkeit verlieren. Im Gegensatz dazu benötigen technische Katalysatoren meist extreme Reaktionsbedingungen, wie z.B. sehr hohe Temperaturen und niedrige pH-Werte [2, S.354f].

3.3 Stark ausgeprägte Reaktionsspezifität

Enzyme weisen sowohl hinsichtlich ihrer Wirkungsweise, als auch ihrer umzusetzenden Substrate eine hohe Spezifität auf. Diese Spezifität beruht vor allem auf einer bestimmen Komplementarität zwischen Substrat und Enzym, die notwendig ist, um eine Bindung zwischen den Beiden herzustellen. Damit das Substrat am aktiven Zentrum des Enzyms binden kann, ist das Vorliegen einer geometrischen Komplementarität erforderlich, was bedeutet, dass die geometrische Form des Substrates genau auf die an der Oberfläche des Enzyms liegende Einbuchtung abgestimmt sein muss. Des Weiteren ist es notwendig, dass eine elektronische Komplementarität gegeben ist. Diese stellt die spezifische Wechselwirkung der Aminosäuren, aus denen das Enzym aufgebaut ist, mit dem Substrat dar (vgl. Abb. 1) [2, S.354f.].

Das zu diesem Kapitel passende Experiment „Stärkeverdauung im Mund – Spezifität der Amylase“ ist in Kapitel 22.1 zu finden.

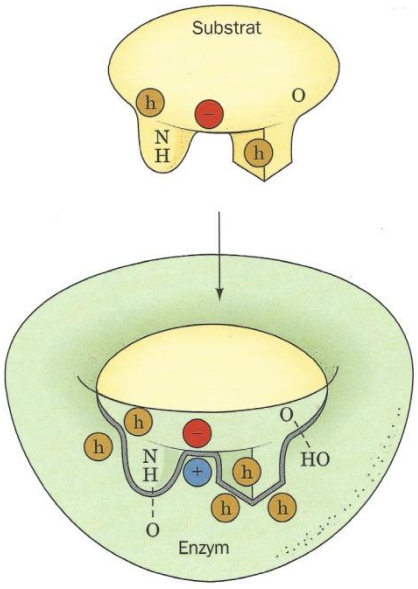


Abbildung 1: Enzym-Substrat Komplex. Geometrische und elektronische Komplementarität beruhen auf nicht kovalenten Wechselwirkungen (aus [2, S.356])

Folgende Arten der Spezifität werden unterschieden:

1. Wirkungsspezifität: Enzyme katalysieren nur eine bestimmte Reaktion, bei deren Umsetzung keine Produktion von Nebenprodukten stattfindet. So katalysieren z.B. Esterasen ausschließlich die hydrolytische Spaltung von Esterbindungen, während es ihnen nicht möglich ist, weitere Reaktionen, die das Substrat eingehen könnte, zu beschleunigen [10, S.15] [13, S.166ff.].
2. Gruppenspezifität: Enzyme, die gruppenspezifisch arbeiten, können mehrere verschiedene Substrate einer chemischen Gruppe binden. Häufig ist es so, dass nur die speziellen funktionellen Gruppen des Substrates an das aktive Zentrum binden, und somit der weitere Molekülaufbau für die Bindung nur eine geringe Rolle spielt. Enzyme, die eine Gruppenspezifität besitzen, können zwar mit mehreren verschiedenen Substraten arbeiten, zeigen dabei aber unterschiedlich starke Effizienz. Als Beispiele für Enzyme mit Gruppenspezifität sind unter anderem Proteasen, die verschiedenste Peptide umsetzten können, und Lipasen, denen unterschiedliche Triglyceride als Substrat dienen, zu nennen [13, S.166ff.][14, S.38].
3. Substratspezifität: Es gibt recht wenige Enzyme, die vollständige Substratspezifität aufweisen und somit in der Lage sind, nur ein einziges Substrat zu binden. Solche Enzyme sind nicht nur auf die Bindungsstelle des Substrates, sondern auf dessen gesamtes Molekül spezialisiert. Ein Exempel ist die Urease, welche allein nur Harnstoff binden und dessen hydrolytische Spaltung katalysieren kann. Des Weiteren besitzt Kreatinkinase Substratspezifität und kann nur mit Kreatin als Substrat arbeiten [13, S.166ff.][14, S.39].
4. Stereospezifität: Die meisten Enzyme können nur ein Enantiomer eines Substrates binden. Diese Art der Spezifität beruht auf dem Aufbau der Enzyme aus den asymmetrischen L-Aminosäuren. Aufgrund der räumlichen Anordnung dieser Aminosäuren ergibt sich ein asymmetrisches aktives Zentrum der Enzyme. Enantiomere eines Substrates docken an unterschiedlichen Stellen an das aktive Zentrum des Enzyms an. Dies hat zu bedeuten, dass solche verschiedene Stereoisomere entweder schwächer, oder gar nicht an das aktive Zentrum eines Enzyms binden können. So kann die D-Lactat-Dehydrogenase nur Reaktionen mit D-Lactat als Substrat katalysieren und im Vergleich dazu kann die L-Lactat-Dehydrogenase nur mit L-Lactat arbeiten [2, S.355ff.][13, S.166ff.].

4 Nomenklatur und Klassifizierung von Enzymen

Emile Duclaux war der Erste, der sich 1898 mit der Nomenklatur von Enzymen beschäftigt hat. Zu dieser Zeit war für Enzyme die Endung –ase kennzeichnend. Diese wurde an den Namen des Substrates, oder an einen die katalysierende Reaktion erklärenden Begriff angehängt. Somit entstanden Namen, wie unter anderem Urease, die aufgrund ihres Substrates, des Harnstoffes oder Urea, diese Bezeichnung erhalten hat. Der Alkoholdehydrogenase wurde aufgrund ihrer katalysierenden Reaktion, der Dehydrierung von Alkoholen, ihre Betitelung zugeschrieben [1][15, S.178]. Für einige Enzyme werden heute noch historische Bezeichnungen, wie z.B. Pepsin (pepsis: griech. = das Kochen), Amylase oder Trypsin verwendet [5, S.70f.].

Da im Laufe der Zeit immer mehr Enzyme entdeckt worden sind – heute sind mehr als 4000 bekannt – musste ein System für eine einheitliche Nomenklatur entwickelt werden. Ein solches wurde 1964 vom Ausschuss der *International Union of Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB)* eingeführt und führte im Wesentlichen zur Einteilung der Enzyme in sechs Klassen. Diese Klassifizierung erfolgt nach Art der von Enzymen katalysierten Reaktionen. Außerdem werden diese sechs Hauptklassen noch in Unterklassen und Subunterklassen gegliedert, wobei hier das passende Substrat und der Akzeptor miteinbezogen werden [1][4, S.50ff.]. Diese Klassifizierung weist jedem Enzym eine vierstellige EC-Nummer (eng. = enzyme classification number) und, zusätzlich systematischen Namen, einen Trivialnamen zu [15, S.178]. Die EC-Nummer besteht aus der Ziffer der Hauptklasse, der Ziffer der Unterklasse, der Ziffer der Subunterklasse, sowie einer in der Subunterklasse existierenden Seriennummer. Der systematische Namen gliedert sich in den Namen des beteiligten Substrates, der Art der Reaktion und der Endung –ase. Als Trivialnamen werden meist historische Kurzbezeichnungen verwendet [16, S.387f.].

Als Beispiel sei hier die Glucose-Oxidase genannt. Dieses Enzym katalysiert die Oxidation von Glucose zu Gluconolacton [19, S. 321]. Glucose-Oxidase ist der Trivialname dieses Enzyms. Systematisch wird es als β-D-Glucose-O_2-1-Oxidoreductase mit einer EC-Nummer von 1.1.3.4 bezeichnet. Die erste Ziffer des EC-Codes gibt mit der Nummer 1 die Hauptklasse der Oxidoreduktasen an, während es sich bei der Unterklasse 1 um auf CH(OH)-Gruppen wirkende Enzyme handelt. Subunterklasse 3 bezeichnet die Gruppe der Enzyme, die mit O_2 als Akzeptor arbeiten. Ziffer 4 gibt die Seriennummer innerhalb der Subunterklasse an [13, S.169].

Mit Hilfe dieses Nomenklatursystems besitzt jedes Enzym, mit Ausnahme von Isoenzymen, eine spezielle Bezeichnung, bzw. einen speziellen EC-Code.

4.1 Isoenzyme

Bei Isoenzymen handelt es sich um Enzyme, welche gleiche Reaktionen katalysieren, aber strukturell geringfügige Unterschiede aufweisen und somit auch verschiedenartige Eigenschaften besitzen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Eigenschaften können diese Isoenzyme mittels Elektrophorese aufgetrennt werden. Das Enzym Hexokinase besitzt z.B. drei Isoenzyme, welche im menschlichen Körper organspezifisch verteilt sind. Alle drei Enzyme katalysieren die Phosphorylierung von Glucose, unterscheiden sich jedoch strukturell in geringem Maße. Alle Isoenzyme eines Enzyms besitzen dieselbe Bezeichnung [16, S.387f.][17, S.26f.].

5 Die sechs Enzymklassen

Enzyme werden nach ihrem Reaktionstypus in sechs Enzymklassen eingeteilt.

5.1 1.Klasse: Oxidoreduktasen

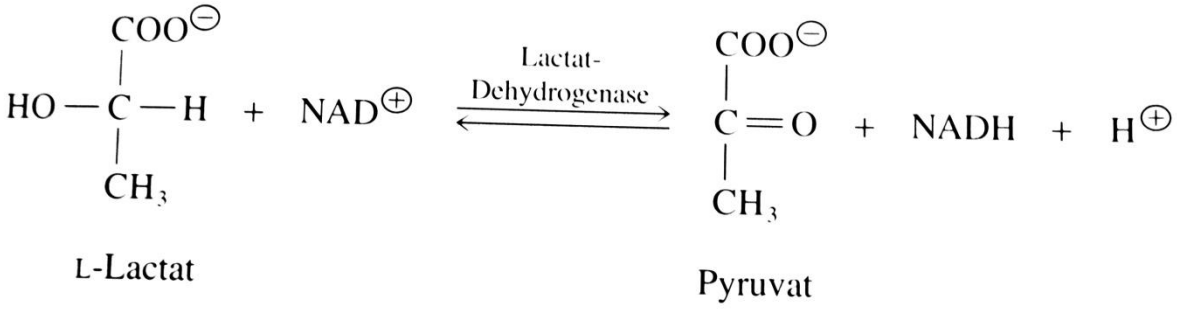
Enzyme, die der Klasse der Oxidoreduktasen angehören, katalysieren Redoxreaktionen, also Übertragungen von Wasserstoff oder Elektronen. Viele Oxidoreduktasen benötigen ein wasserstoffübertragendes Coenzym, wie es unter anderem Nicotinamidadenindinucleotid (NAD) ist, um effizient zu arbeiten [4, S.51]. Da es sich bei vielen Redoxreaktionen um Dehydrierungen handelt, werden viele dieser Enzyme auch als Dehydrogenasen bezeichnet. Des Weiteren gehören Reduktasen, welche die Reduktion eines Substrates katalysieren, Oxidasen, welchen molekularer Sauerstoff als Elektronenakzeptor dient, Oxygenasen, die molekularen Sauerstoff auf ein Substrat übertragen und Peroxidasen, welche die Reduktion von Peroxiden katalysieren, dieser Klasse von Enzymen an [13, S.169f.][15, S.179].

Eine allgemeine Gleichung einer von Oxidoreduktasen katalysierten Reaktion lässt sich wie folgt aufstellen [5, S.70]:

$$R - XH + Y \rightarrow R = X + HY$$

Als konkretes Beispiel dient Lactat-Dehydrogenase mit dem systematischen Namen „Lactat: NAD – Oxidoreduktase“ [15, S.179].

Dieses Enzym katalysiert die Oxidation von L-Lactat zu Pyruvat, sowie die Reduktion des Coenzyms NAD^+ zu NADH, welche mit der erst genannten Reaktion einhergeht [15, S.179]:



L-Lactat Pyruvat

Abbildung 2: Reaktion von L-Lactat zu Pyruyat mittels Lactat-Dehydrogenase [15, S.179].

Experimente mit Oxidoreduktasen sind in Kapitel 22.3 zu finden.

5.2 2.Klasse: Transferasen

Transferasen übertragen funktionelle Gruppen, wie z.B. Methyl-, Amino- oder Phosphatreste, von einem Substrat auf ein zweites. Auch bei dieser Klasse von Enzymen werden meist Coenzyme, wie z.B. Adenosintriphosphat (ATP), benötigt [13, S.169f.].

Eine allgemeine Reaktionsgleichung lässt sich folgendermaßen formulieren [5, S.70]:

$$R - X + Y \rightarrow R + XY$$

Eine sehr wichtige Gruppe unter den Transferasen bilden die Kinasen, welche, unter Verbrauch von ATP, die Übertragung von Phosphatresten auf Substrate katalysieren. Das Enzym Alanin-Transaminase mit der systematischen Bezeichnung „L-Alanin:2-Oxoglutarat-Aminotransferase“ soll zur Veranschaulichung einer solchen Transferase-Reaktion dienen. Dieses Enzym katalysiert die Reaktion von Alanin und α-Ketoglutarat zu Pyruvat und L-Glutamat [15, S. 179]:

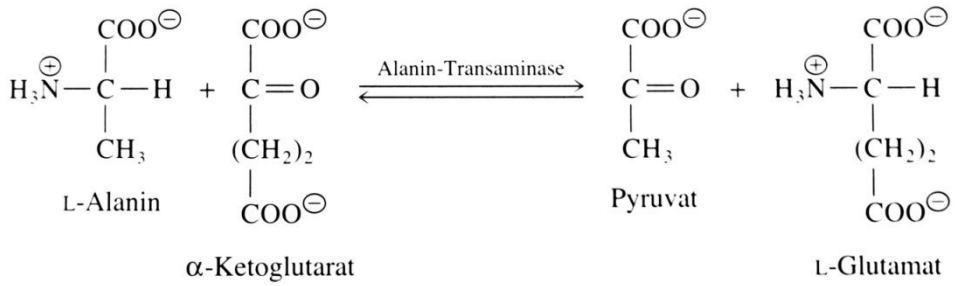


Abbildung 3: Reaktion von Alanin und α-Ketoglutarat zu Pyruvat und L-Glutamat mittels Alanin-Transaminase [25, S.179].

5.3 3.Klasse: Hydrolasen

Hydrolasen katalysieren Spaltungen von Elektronenpaarbindungen, wie z.B. Ester-, Ether-, Peptid- oder Glycosidbindungen unter Aufnahme von Wasser. Somit können Hydrolasen als eine spezielle Art von Transferasen bezeichnet werden. Der Unterschied dieser beiden Gruppen besteht darin, dass bei Hydrolasen anstelle von Coenzymen Wasser als Akzeptor für die übertragenden Gruppen dient [17, S.25][18, S.72f.]. Zur Klasse der Hydrolasen zählen Esterasen, Glycosidasen, Peptidasen, Nucleasen und Phosphatasen [4, S.51].

Das allgemeine Reaktionsschema wird wie folgt ausgedrückt [5, S.70]:

$$R_1 - X - R_2 + H_2O \rightarrow R_1OH + HX - R_2$$

Ein bekanntes Beispiel einer Hydrolase ist die Pyrophosphatase, systematisch Diphosphat-Phosphohydrolase, welche die hydrolytische Spaltung von Pyrophosphat katalysiert [15, S.179]:

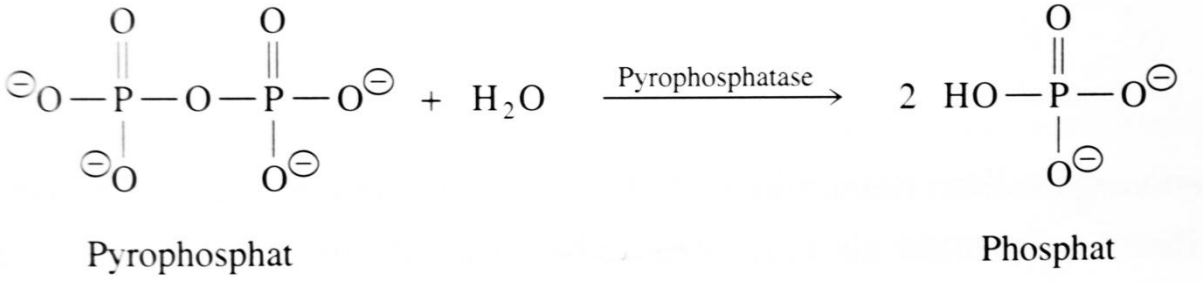


Abbildung 4: Reaktion von Pyrophosphat und Wasser zu Phosphat mittels Pyrophosphatase [15, S.179].

Experimente mit Hydrolasen sind in Kapitel 22.1 zu finden.

5.4 4.Klasse: Lyasen

Lyasen können zwei Arten von Reaktionen katalysieren. Entweder beschleunigen sie eine Eliminierungsreaktion, indem ein Substrat an einer C-C -, einer C=O -, oder einer C-N – Bindung nicht-hydrolytisch gespalten wird und eine Doppelbindung entsteht, oder sie katalysieren den gegenläufigen Prozess, der als Additionsreaktion bezeichnet wird. Hierbei wird eine funktionelle Gruppe an eine Doppelbindung gebunden, wodurch diese in eine Einfachbindung übergeht. Lyasen, die Additionsreaktionen katalysieren, werden als Synthasen bezeichnet [4, S.51][5, S.71][18, S.72f.].

Die allgemeine Reaktionsgleichung, mittels Lyasen katalysierter Reaktionen, lautet folgendermaßen [5, S.71]:

$$R - C\,(-OH) = O \;\rightarrow R - H + O = C = O$$

Als Beispiel einer Lyase sei die Pyruvat-Decarboxylase, systematisch 2-Oxocarbonsäure-Carboxy-Lyase, genannt. Hierbei handelt es sich um ein Enzym, das die Eliminierung von CO_2 aus Pyruvat und somit die Reaktion von Pyruvat zu Acetaldehyd katalysiert, wodurch der Citratzyklus eingeleitet wird [2, S.548][15, S.180]:

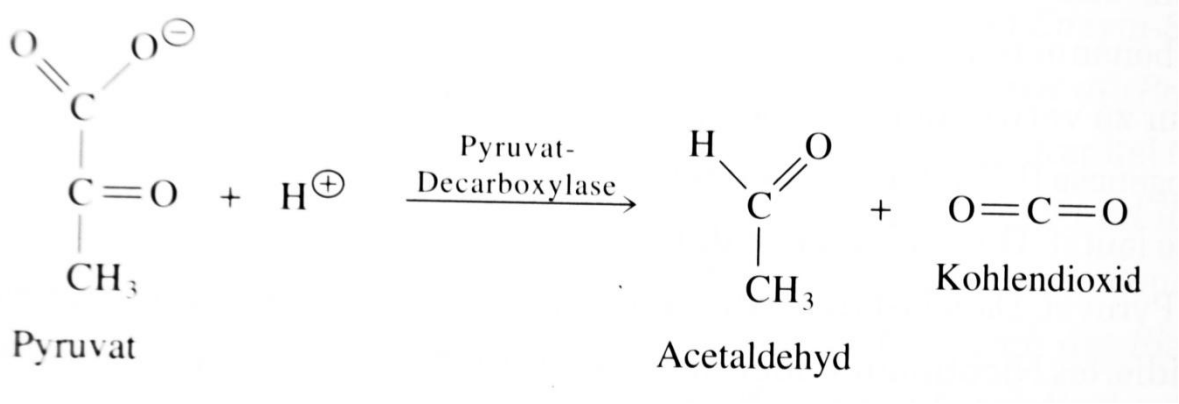


Abbildung 5: Reaktion von Pyruvat zu Acetaldehyd mittels Pyruvat-Decarboxylase [15, S.180].

Experimente mit Lyasen sind in Kapitel 22.2 zu finden.

5.5 5.Klasse: Isomerasen

Isomerasen katalysieren Umlagerungen innerhalb eines isomeren Moleküls. Hierbei handelt es sich um strukturelle Veränderungen, um Isomerisierungsreaktionen, von nur einem Substrat zu einem Produkt. Innerhalb dieser Umlagerungen kommt es zum Aufbrechen und zur anschließenden Neubildung von kovalenten Bindungen [14, S.47][15, S.180].

Zu dieser Klasse von Enzymen zählen unter anderem Epimerasen und Racemasen, die aufgrund von strukturellen Veränderungen am chiralen C-Atom des Substrates auf die optische Aktivität desselben einwirken können. Außerdem gehören Cis-Trans-Isomerasen, intramolekulare Transferasen (Mutasen) und intramolekulare Oxidoreduktasen (Enolasen) dieser Gruppe von Enzymen an [4, S.51f.].

Das allgemeine Reaktionsschema dieser Enzymklasse lässt sich wie folgt erklären [5, S.71]:

$$R-(X-)C=(Y-)C-R \rightarrow R-(X-)C=C(-Y)-R$$

Das Enzym Alanin-Racemase, welches die Umwandlung von L-Alanin und das Stereoisomer D-Alanin katalysiert, soll als veranschaulichendes Beispiel dienen [15, S.180]:

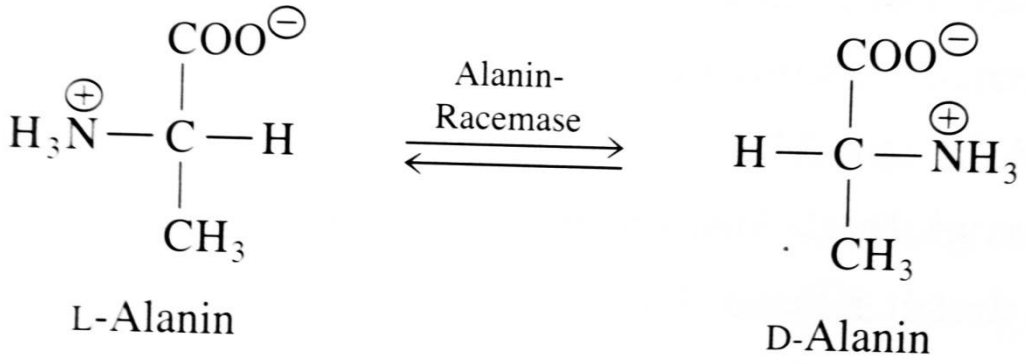


Abbildung 6: Reaktion von L-Alanin zu D-Alanin mittels Alanin-Racemase [15, S.180].

5.6 6.Klasse: Ligasen

Ligasen katalysieren den Zusammenschluss zweier Substrate aufgrund einer Neubildung von kovalenten Bindungen. Da es sich bei Ligasen um endergone Enzyme handelt, werden bei diesen Reaktionen Nucleosidtriphosphate verbraucht, indem eine ihrer Phosphorsäureanhydridbindungen gespalten wird.

Das am häufigsten als Energieträger eingesetzte Nucleosidtriphosphat ist das Adenosintriphosphat (ATP) [11, S.424][13, S.169f.].

Ligasen werden häufig auch als Synthetasen – nicht zu verwechseln mit Synthasen – bezeichnet [18, S.72-73] und ihr allgemeines Reaktionsschema lautet wie folgt [5, S.71]:

$$R - H + X + ATP \rightarrow R - X + ADP + P_i$$

Als Beispiel für ein Enzym aus der Klasse der Ligasen sei die Glutamin-Synthetase oder L-Glutamat:Ammoniak-Ligase genannt. Dieses Enzym katalysiert die Reaktion von L-Glutamat und Ammoniak zu L-Glutamin, wobei eine Phosphosäureanhydridbindung eines Moleküls ATP gespalten wird [15, S.180f.]:

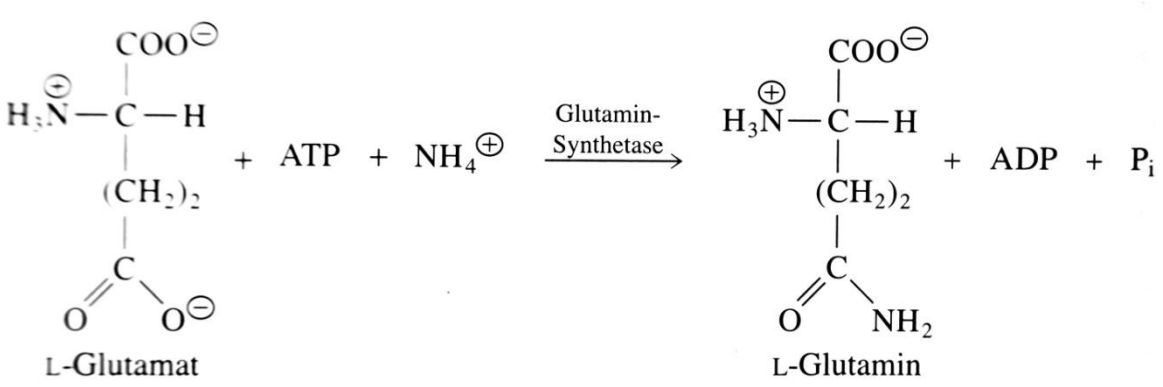


Abbildung 7: Reaktion von L-Glutamat zu L-Glutamin mittels Glutamin-Synthetase [15, S.180].

Nachstehende Tabelle liefert eine Übersicht über die sechs Enzymklassen und gibt Beispiele von Enzymen dieser Klassen an. Dazu passende Experimente, ebenfalls eingeteilt nach Enzymklassen, sind in den Kapiteln 19-22 zu finden.

Tabelle 1: Übersicht über die sechs Enzymklassen und die entsprechenden charakteristischen Enzyme.

Klasse	Nennenswerte Enzyme	Beispiele für Experimente
Oxidoreduktasen	Katalase, Phenolase, Peroxidasen, Schardinger-Enzym	Kapitel 22.3: Wirkungsweise von Enzymen als Katalysatoren, Lebervergiftung, Unterschiede zwischen roher und erhitzter Milch, Todesringe und Todesstreifen…
Transferasen	Hexokinase, Pyruvatkinase	keine passenden Schulversuche
Hydrolasen	Urease, Amylasen, Protteinasen, Cellulasen, Lipasen, Chlorophyllase	Kapitel 22.1: Hydrolyse von Harnstoff durch Urease, Nachweis von Amylase in Honig/Waschmittel, Nachweis der Chlorophyllase in grünen Bohnen…
Lyasen	Alliinase, Carboanhydrase	Kapitel 22.2: Nachweis der Alliinase in Zwiebeln, Carboanhydrase und das Kohlenstoffdioxid-Kohlensäure-Gleichgewicht
Isomerasen	Glucose-Isomerase, Pentosephosphat-Isomerase	keine passenden Schulversuche
Ligasen	Pyruvat – Carboxylase, Succinyl-CoA-Synthetase	keine passenden Schulversuche

6 Chemischer Aufbau von Enzymen

6.1 Enzyme sind Proteine

Alle derzeit bekannten Enzyme gehören der Stoffklasse der Proteine an. Die einzige Ausnahme bilden einige enzymatisch wirksame, als Ribozyme bezeichnete, Ribonukleinsäuren. Bei den meisten Enzymen handelt es sich um globuläre, sehr gut wasserlösliche Proteine, mit einem Molekulargewicht von 10000 bis hin zu mehreren Millionen Dalton [11, S.422f.][12, S.64][19, S.245].

Da Enzyme der Klasse der Proteine angehören, sind diese genauso aus den 20 proteinogenen, von Organismen codierten Aminosäuren aufgebaut. Hierbei handelt es sich um α-L-Aminosäuren, die mittels Peptidbindungen zu einem Polypeptid verknüpft werden. Unter einer Peptidbindung versteht man die Kondensation der Aminogruppe einer Aminosäure mit der Carboxylgruppe einer weiteren Aminosäure unter Abspaltung von Wasser. Enzyme sind meist aus mehreren dieser Polypeptidketten aufgebaut [10, S.13f., S.473f.][20, S.107ff.].

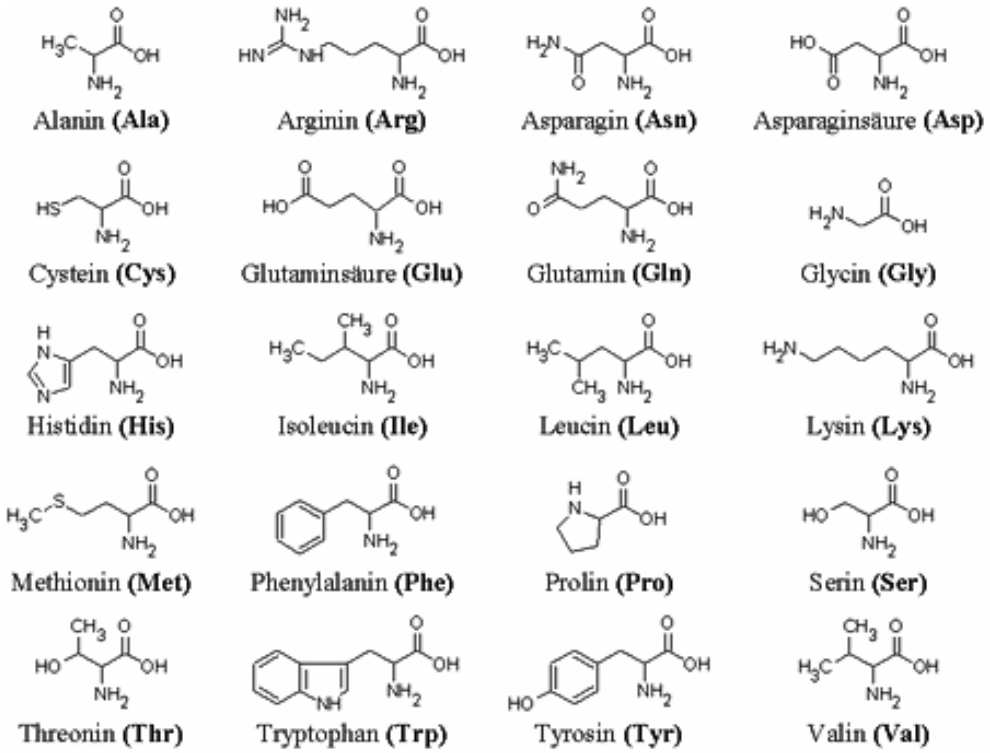


Abbildung 8: Darstellung der 20 proteinogenen Aminosäuren [92].

Besonders interessant für den Aufbau von Enzymen sind die Seitenketten der Aminosäuren, die unter anderem saurer oder basischer Natur sein können. Da einige Aminosäuren in ihren Seitenketten über noch frei protonierbare Gruppen, wie eine weitere Amino- oder Carboxylgruppe, verfügen, weisen Enzyme je nach pH-Wert unterschiedliche Ladungen auf und zeigen somit einen ampholytischen Charakter. Aufgrund dieser Eigenschaft besitzen Enzyme bei unterschiedlichen pH-Werten verschiedenartige Ladungen, was dazu führen kann, dass Reaktionen häufig nur mehr in geringem Ausmaß, oder gar nicht mehr katalysiert werden können. Deshalb wird jedem Enzym ein spezifisches pH-Optimum zugewiesen [2, S.87ff.][4, S.4ff.][21, S.29f.]. Die 20 proteinogenen Aminosäuren, die als Grundbaustein der Enzyme dienen, sind in Abbildung 8 dargestellt.

6.2 Vier Ebenen der Enzymstruktur

6.2.1 Primärstruktur

Die Struktur von Proteinen, also auch jene von Enzymen, gliedert sich in vier Stufen. Auf der untersten Ebene steht die Primärstruktur. Diese gibt die Frequenz von Aminosäuren an, also die Reihenfolge, in der die verschiedenen Aminosäuren mittels Peptidbindungen aneinandergereiht sind. Natürlich ist nicht nur die Abfolge der Aminosäuren, sondern auch deren Häufigkeit und Verhältnis zueinander, entscheidend für den Aufbau und den damit einhergehenden Eigenschaften eines Enzyms [2, S.106f.][4, S.9]. Eine solche Aminosäurenabfolge wird immer vom Aminoende hin zum Carboxylende gelesen und meist im Dreibuchstabencode angegeben. Dreistric Hirs, Stein und Moore gelang es 1959 als Erste die Primärstruktur eines Enzyms, nämlich der Ribonuklease, zu analysieren [4, S.9].

6.2.2 Sekundärstruktur

Die Sekundärstruktur von Enzymen geht einher mit den Peptidbindungen zwischen den einzelnen Aminosäuren. Peptidbindungen haben aufgrund von Resonanzphänomenen bzw. partiellen Elektronenüberlappungen zwischen Carbonyl-Sauerstoff und Amid-Wasserstoff, welche immer in trans-Konfiguration zueinander stehen, keine Drehungsfreiheit. Die Peptidbindung selbst ist planar und starr, drehen können sich nur die an diese Bindung anschließenden C-Cα - und N-Cα – Bindungen, deren Winkel als psi (ψ), bzw. phi (φ) bezeichnet werden.

Diese beiden Rotationswinkel können theoretisch Werte von -180 bis hin zu +180 einnehmen, jedoch sind einige dieser Werte aufgrund von sterischen Behinderungen nicht möglich. Gopalasamudram Ramachandran erstellte ein nach ihm benanntes Diagramm, in welchem die möglichen Winkelwerte von psi und phi dargestellt sind [2, S.145f.][15, S.122ff.][19, S.157][21, S.43].

Die Sekundärstruktur von Enzymen wird nun von diesen beiden oben genannten Rotationswinkeln bestimmt und beschreibt die sterische Anordnung des Polypeptidrückgrats. Vom Polypeptidrückgrat spricht man, wenn man nur die in die einzelnen Peptidbindungen eingebundenen Atome betrachtet, und die Seitenketten der Aminosäuren nicht berücksichtigt [2, S.145f.][19, S.157f.].

Die einfachste von Polypeptidketten einzunehmende Struktur ist die α-Helix, welche zusammen mit einer weiteren sehr häufig auftretenden Anordnung, dem β-Faltblatt, 1951 von Linus Pauling und Robert Corey entdeckt worden ist. Weitere Beispiele für solche Sekundärstrukturen liefern unter anderem die β-Haarnadelkehre oder die Ω-Schleifen. Ein Protein, bzw. ein Enzym besitzt nicht nur eine Form von Sekundärstruktur, sondern es können mehrere verschiedene Strukturen nebeneinander vorliegen [19, S.157ff.][21, S.43ff.].

Da Polypeptidketten sehr häufig α-Helix- und β-Faltblattstrukturen zeigen, werden diese beiden Anordnungen nachstehend genauer betrachtet.

1. α-Helix

Die α-Helix zeigt sich nach außen hin als stabförmiges Gebilde, wobei das Polypeptidrückgrat den inneren Teil bildet und die Aminosäurenseitenketten schraubenförmig nach außen zeigen. Hierbei handelt es sich um eine rechtsgängige Helix mit einer Ganghöhe von 0,54 nm und einem Anteil von 3,6 Aminosäuren pro Windung. Stabilisiert wird diese Struktur von intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den N-H- und den C-O-Gruppen des Polypeptitrückgrats [2, S.147][15, S.126ff.].

2. β-Faltblatt

Bei β-Formationen sind im Gegensatz zur α-Helix die Polypeptidketten nicht eng zusammengerollt, sondern fast vollständig ausgestreckt und die Reste aneinander grenzender Aminosäuren zeigen in entgegengesetzte Richtungen.

Dadurch entstehen sogenannte β-Stränge, die, verknüpft mittels Wasserstoffbrücken zwischen Carbonylsauerstoffatomen und Amidwasserstoffatomen, eine ziehharmonikaähnliche Struktur namens β-Faltblatt bilden können.

Laufen die beiden benachbarten Stränge in die gleiche Richtung und sind somit das N-, sowie das C-terminale Ende der beiden Stränge nebeneinander angeordnet, so spricht man von einem parallelen Faltblatt. Ist dies nicht der Fall, und die beiden Stränge laufen in entgegengesetzte Richtungen, so handelt es sich um ein antiparalleles Faltblatt [15, S.130ff.][21, S.45ff.].

6.2.3 Tertiärstruktur

Die Tertiärstruktur von Proteinen beschreibt die Faltung der einzelnen Sekundärstrukturelemente hin zu einer dichten Struktur.

Diese dritte Ebene der Enzymstrukturen geht auf die einzelnen Aminosäurereste der Polypeptidketten ein. Es können auch Aminosäuren, die laut Primärstruktur weit voneinander entfernt am Polypeptidstrang liegen, innerhalb der Tertiärstruktur benachbarte Plätze einnehmen, und somit miteinander wechselwirken. Die Tertiärstruktur legt die Position eines jeden Atoms der Polypeptidkette dar und ist somit kennzeichnend für den charakteristischen Aufbau und die sich daraus ableitenden Eigenschaften von Proteinen. Grund für die sich formenden Sekundärstrukturelemente ist das Abschirmen von hydrophoben Anteilen nach innen und das nach außen Tragen der hydrophilen, geladenen Aminosäureresten in wässriger Umgebung. Es gibt Anordnungen von Sekundärstrukturen, die besonders häufig vorkommen und auch dieselbe Funktion besitzen. Hierbei spricht man von Supersekundärstrukturen, welche Teil einer Tertiärstruktur sein können. Außerdem können sich bei besonders langen Polypeptidketten mit mindestens 200 Aminosäureresten sogenannte Domänen bilden. Dabei handelt es sich um unabhängig voneinander verschiedenartig gefaltete Bereiche innerhalb eines Polypeptids [2, S.158f.][15, S.134ff.][19, S.162].

6.2.4 Quartärstruktur

Häufig bestehen Proteine nicht nur aus einer, sondern sind aus mehreren zu funktionellen Einheiten verknüpften Polypeptidketten zusammengesetzt. Dabei können gleiche oder verschiedene Polypeptidstränge mittels nicht-kovalenter Bindungen miteinander gekoppelt werden. Eine solche Polypeptidkette wird als Untereinheit bezeichnet und abhängig davon, aus wie vielen Untereinheiten das Peptid besteht, handelt es sich um ein Dimer, Trimer, Tetramer etc. [6, S.55ff.][22, S.78ff.].

Die Quartärstruktur von Proteinen beschreibt die Korrelation der einzelnen Untereinheiten eines Proteins und die daraus resultierende dreidimensionale Struktur. Strukturell kann man Faserproteine und globuläre Proteine unterscheiden. Bilden die einzelnen Polypeptidketten langgezogene Stränge, so handelt es sich um Faserproteine. Werden kugelartige Strukturen geformt, so spricht man von globulären Proteinen [19, S.162].

6.3 Das aktive Zentrum

Das aktive Zentrum, der sogenannte katalytische Kern, ist für die eigentliche Wirkungsweise der Biokatalysatoren verantwortlich. In diesem Zentrum bindet das umzusetzende Substrat und die katalytische Reaktion läuft an diesem Ort des Enzyms ab. Ein Enzym kann mehrere aktive Zentren besitzen [23, S.15f.].

Der Aufbau von Enzymen aus Aminosäuren und deren Wechselwirkungen untereinander führen zu einer spezifischen Raumstruktur. Obwohl Enzyme meist recht groß sind, bilden nur kleine Abschnitte der Polypeptidketten das aktive Zentrum aus. Häufig wechselwirken in diesem Zusammenhang Aminosäuren, die laut Primärstruktur recht weit voneinander entfernt am Polypeptidstrang angeordnet sind. Die restlichen Aminosäuren fungieren dabei als Gerüst und dienen zur Ausbildung der Tertiär- bzw. Quartärstruktur. Die Formation des aktiven Zentrums wird ermöglicht, indem am Polypeptidstrang weit abseits voneinander gelegene Aminosäuren zusammengeführt werden [10, S.12ff.][21, S.238ff.].

Das aktive Zentrum zeigt sich als dreidimensionale Einbuchtung oder Spalte, in diese das umzusetzende Substrat binden kann. Stabilisiert wird dieses von den Aminosäureresten, die das aktive Zentrum ausbilden. Meist handelt es sich dabei um Seitenketten von sauren, basischen oder hydrophoben Aminosäuren [16, S. 371ff.].

Dieses katalytische Kernstück muss nicht zwingend Teil des Proteins sein. Eine weitere Form besteht darin, dass eine Gruppe ohne Proteincharakter an der Ausbildung dieses Zentrums beteiligt ist [17, S.28].

6.4 Cofaktoren

Neben Enzymen, die ausschließlich aus Proteinen bestehen, gibt es jene, die sich in einen Proteinanteil, das Apoenzym, und einen Nicht-Proteinanteil gliedern. Dieses zusammengesetzte Enzym wird als Holoenzym bezeichnet.

Eine Sparte dieser Hilfsmoleküle stellen unter anderem metallische Kationen wie z.B. Fe^{2+}, Zn^{2+} oder Mo^{2+} dar, die mittels elektrostatischer Wechselwirkungen an das Enzym gebunden sind. Des Weiteren gibt es sogenannte Coenzyme und prosthetische Gruppen. Hierbei handelt es sich um organische Verbindungen, die eine stöchiometrische, aber keine katalytische Umsetzung des Substrates bewirken.

Diese Wirkgruppen weisen im Gegensatz zu den Enzymen, mit denen sie kooperieren, keine Spezifität auf, sondern können ihre Funktion bei vielen verschiedenen Enzymen zeigen. Solche Cofaktoren leiten sich häufig von mit der Nahrung zugeführten Vitaminen ab [10, S.18ff.][11, S.422f.].

6.5 Coenzyme

Coenzyme sind mittels zwischenmolekularer Wechselwirkungen an das Apoenzym gebunden. Diese Art von Wirkgruppe wird bei der katalytischen Reaktion verändert und muss im Anschluss regeneriert werden. Um diese Regeneration zu erreichen, ist ein zweites Apoenzym notwendig. Coenzyme trennen sich nach vollständig abgelaufener Reaktion vom Apoenzym und binden anschließend ein weiteres, das die Reaktion zur Regeneration des Coenzyms katalysiert.

Coenzyme können in drei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe besteht aus wasserstoffübertragenden Wirkgruppen, wie es Nicotinamiddinucleotide sind. Die zweite Gruppe bilden gruppenübertragende Substanzen, zu denen unter anderem Adenosintriphosphat zählt, und in die dritte Gruppe fallen Wirkgruppen von Isomerasen und Lyasen, wie es Pyridoxalphosphat ist [10, S.20ff.][18, S.78f.].

Als Beispiele für sehr wichtige Coenzyme seien Nicotinamiddinucleotide genannt, deren Wirkungsweise im Folgenden beschrieben wird.

6.5.1 Nicotinamiddinucleotide [2, S.507f.][10, S.18ff.]

Nicotinamidadenindinucleotid wurde als erstes Coenzym 1931 von H. v. Euler entdeckt.

Nicotinamiddinucleotide sind sehr bedeutende Vertreter wasserstoffübertragender Coenzyme und bilden Hilfsgruppen von Oxidoreduktasen. Diese Wirkgruppen bestehen aus einer Base, einem Zucker und einer Phosphorsäure. Binden sie an ein zweites Nucleotid, mit Adenin als Base, so können die beiden unterschiedlichen Dinucleotide Nicotinaminadenindinucleotid (NAD) und Nicotinamidadenindinucleotidphosphat (NADP) entstehen.

Das Nicotinamid ist ein stickstoffhaltiges Derivat des Pyridin und der eigentliche aktive Kern dieses Coenzyms bildet das Nicotinsäureamid. An dieser Stelle erfolgt die reversible Bindung des Wasserstoffatoms, wodurch sowohl NAD, als auch NADP reduziert werden können und somit mit deren reduzierten Formen NADH und NADPH ein Redoxsystem bilden.

Es gibt noch viele weitere Coenzyme, mit der Eigenschaft Redoxsysteme darzustellen.

Wie bei Coenzymen obligat, wird das durch die katalytische Reaktion veränderte Coenzym vom einen Apoenzym abgespalten und auf ein weiteres übertragen, wo es zu seiner ursprünglichen Struktur regeneriert wird.

Bei der Oxidation eines Substrates binden Nicotinamiddinucleotide Wasserstoff in Form eines Hydrid-Ions und werden dadurch reduziert. Nach abgelaufener Reaktion wird das Coenzym auf ein Apoenzym übertragen, das eine Reduktionsreaktion katalysiert. Durch diese Reaktion wird der Wasserstoff des Nicotinamiddinucleotids entfernt und dieses liegt wieder in seiner Ausgangsform vor.

Die nachstehende Abbildung zeigt die Reaktion des Coenzyms NAD^+ zu NADH.

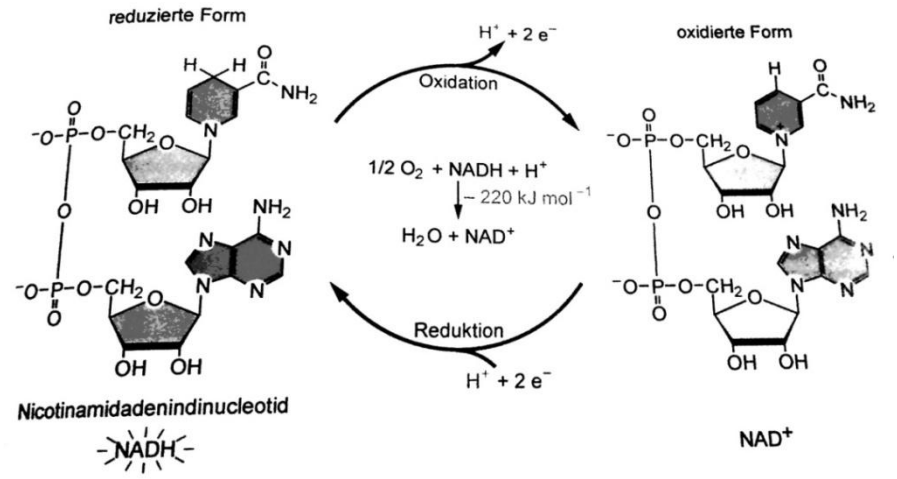


Abbildung 9: Nicotinamidadenindinucleotid [22, S.55].

6.6 Prosthetische Gruppen

Bei prosthetischen Gruppen handelt es sich, wie bei Coenzymen, ebenfalls um organische Moleküle als Wirkgruppen von Enzymen. Genauso wie Coenzyme werden prosthetische Gruppen durch die katalytische Reaktion verändert und müssen anschließend regeneriert werden. Im Gegensatz zu Coenzymen wird die prosthetische Gruppe jedoch nach der Reaktion nicht vom Apoenzym abgespalten, sondern bleibt mit dem Enzym verbunden. Zur Regeneration ist ein zweites Substrat notwendig, das der ersten Reaktion folgend umgesetzt wird. Somit werden prosthetische Gruppen am selben Enzym regeneriert [17, S.29][18, S.78f.].

7 Verlauf enzymatischer Reaktionen

Betrachtet man eine herkömmliche chemische Reaktion, so kann man diese wie folgt darstellen:

$S \rightarrow P$

Im Gegensatz dazu wurde eine enzymatisch katalysierte Reaktion 1913 von Michaelis und Menten nach dem Schema der Zwischenstoffkatalyse beschrieben:

$E + S \leftrightarrow ES \leftrightarrow EP \leftrightarrow E + P$

In diesem Zusammenhang steht E für das Enzym, S für das Substrat und P für das Produkt. Des Weiteren stellt ES den Enzymsubstratkomplex dar und EP ist kennzeichnend für den Enzymproduktkomplex [12, S.67].

Nachstehend wird genauer auf diesen Reaktionsmechanismus von Enzymen eingegangen und dargelegt, wodurch es Enzymen gelingt, chemische Reaktionen mit einer so hohen Effizienz zu beschleunigen.

7.1 Theorie des Übergangszustandes

Die Theorie des Übergangszustandes dient als Verständnisgrundlage des Prinzips der enzymatischen Katalyse. Diese Theorie wurde 1930 von Henry Eyring postuliert und zeigt, dass es bei chemischen Reaktionen stets vor der Bildung der Produkte zur Formierung eines Übergangszustandes kommt [2, S.359f.]. In diesem Übergangszustand sind die Bindungen zwischen den Reaktanten bereits teilweise aufgebrochen, während die Bindungen der Produkte zum Teil schon geknüpft werden [13, S.176f.].

Aufgrund ihrer inneren Energie sind Teilchen ständig einer Schwingung ausgesetzt. Um eine Reaktion zu ermöglichen, muss diese Eigenbewegung der zu reagierenden Teilchen so hoch sein, dass es für einen Reaktionszusammenstoß ausreicht. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die meisten aller Teilchen und Moleküle metastabil sind und somit nicht ohne Energiezufuhr befähigt sind zu reagieren. Diese für eine Reaktion erforderliche Energie kann unter anderem in Form von Wärme zugeführt oder mit Hilfe von Katalysatoren so weit erniedrigt werden, sodass eine Reaktion bereits unter herkömmlichen Bedingungen stattfinden kann. Da hohe Temperaturen im Organismus fatale Folgen haben können, sind dort Enzyme für diese Energieerniedrigung zuständig [15, S.222ff.][23, S.12f.].

Um diesen Mechanismus einer chemischen Reaktion zu verstehen, ist ein sogenanntes Reaktionskoordinatendiagramm hilfreich (siehe Abb.10). Bei einem solchen Diagramm wird die freie Enthalpie G gegen die Reaktionskoordinate aufgetragen und dadurch der energetische Verlauf der Reaktion zweier Reaktanten A und B zu den beiden Produkten P und Q dargestellt. Betrachtet man den Verlauf der freien Enthalpie während dieser dargestellten Reaktion, so sieht man, dass sich Reaktanten und Produkte im Zustand niedrigster freier Enthalpie befinden, wobei es sich hier um ein asymmetrisches Diagramm handelt, und der Übergangszustand am Punkt der höchsten freien Enthalpie liegt [2, S.359f.][22, S.142f.].

Damit die Reaktanten in den energetisch höher gelegenen Übergangszustand übergehen können, muss die sogenannte freie Aktivierungsenergie $\Delta G^{\ddagger}$ aufgewendet werden.

Hierbei handelt es sich um die Differenz der freien Enthalpie zwischen dem Übergangszustand und der Ausgangsstoffe. Die Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endstoffen der Reaktion, das $\Delta G_{Reaktion}$, gibt an, in welche Richtung die Reaktion verläuft. Ist das $\Delta G_{Reaktion}$ negativ, so verläuft die Reaktion spontan von Seiten der Edukte zu den Produkten und wird als exergonisch bezeichnet. Im Gegensatz dazu ist ein positives $\Delta G_{Reaktion}$ für eine endergonische Reaktion kennzeichnend, welche spontan von Seiten der Produkte zu den Edukten verläuft [2, S.359f.][22, S.142f.].

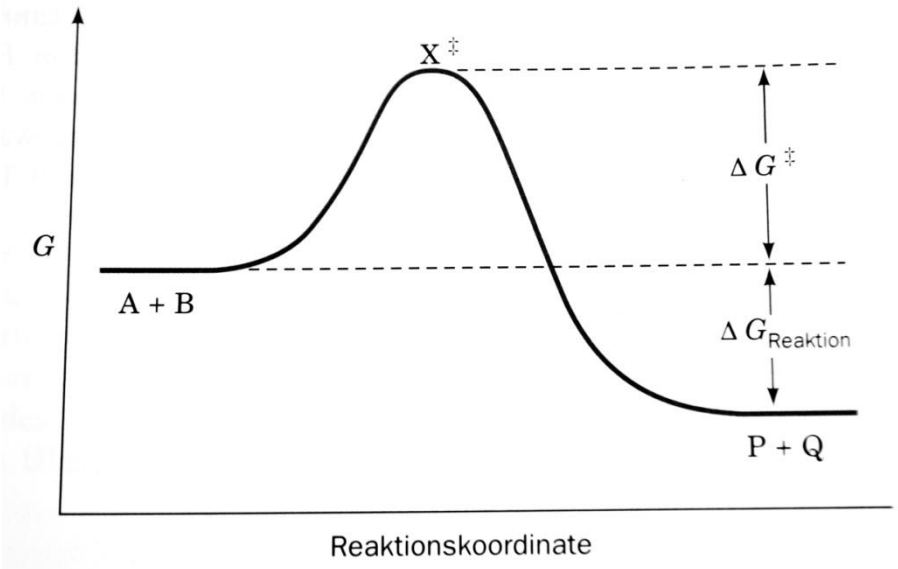


Abbildung 10: Reaktionskoordinatendiagramm [2, S.359].

Da die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen laut Arrhenius proportional zu $e^{-\Delta G^{\ddagger}/RT}$ ist, wobei R die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur darstellt, wird der Zerfall des Übergangszustandes zu den Produkten als geschwindigkeitsbestimmender Schritt bezeichnet. Der Übergangszustand selbst ist sehr kurzweilig und wird in 10^{-13} bis 10^{-14} Sekunden durchlaufen [2, S.359f.][13, S.175ff.].

Je mehr freie Aktivierungsenergie $\Delta G^{\ddagger}$ aufzuwenden ist, um den Übergangszustand zu erreichen, desto langsamer läuft die Reaktion ab, da viel weniger Teilchen genügend Energie besitzen, um einen Reaktionszusammenstoß bewirken zu können. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt somit mit steigendem $\Delta G^{\ddagger}$ exponentiell ab. Im Gegensatz dazu sagt das $\Delta G_{Reaktion}$ nichts über die Reaktionsgeschwindigkeit aus [22, S.142f.].

Enzyme katalysieren Reaktionen nun dahingehend, dass sie die nötige freie Aktivierungsenergie $\Delta G^{\ddagger}$ erniedrigen, und somit die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen, wodurch sich das Reaktionsgleichgewicht schneller einstellen kann. Katalysatoren senken die freie Enthalpie des Übergangszustandes einer Reaktion sowohl für die Hin-, als auch für die Rückreaktion, haben jedoch keinen Einfluss auf das $\Delta G_{Reaktion}$ und können somit das Gleichgewicht chemischer Reaktionen nicht verschieben, sondern nur deren Einstellung beschleunigen [21, S.234ff.].

Diese enzymatische Katalyse erfolgt sehr effektiv. Um einer Reaktion eine zehnfache Geschwindigkeitserhöhung zuzuführen, muss das Enzym eine Energie von 5,71kJ aufwenden, welche lediglich der Hälfte der Energie einer herkömmlichen Wasserstoffbrückenbindung entspricht. Daraus lässt sich schließen, dass Enzyme bereits bei recht geringem Energieaufwand eine extreme Beschleunigung chemischer Reaktionen bewerkstelligen können [2, S.359f.].

7.2 Die Funktionsweise von Enzymen

Woraus beziehen nun Enzyme diese Energie, die nötig ist, damit Reaktanten in den Übergangszustand der Reaktion übergehen können?

Enzyme schöpfen Energie aus zwei unterschiedlichen Quellen.

Alleine durch die Bindung des Substrates an das Enzym und dem daraus resultierenden Enzym-Substrat-Komplex wird die Aktivierungsenergie einer Reaktion verringert, indem ein energetisch attraktiverer Reaktionsweg geboten wird.

Hierbei handelt es sich um ein Umordnen kovalenter Bindungen, das mit dem Binden des Substrates an das aktive Zentrum des Enzyms einhergeht und sich energiesparend auf die Reaktion auswirkt.

Des Weiteren haben vor allem auch nicht kovalente Kräfte, die den Enzymsubstratkomplex stabilisieren und zwischen Enzym und Substrat wirken, enorme Auswirkungen auf den energetischen Verlauf einer Reaktion. Ist der Enzymsubstratkomplex ausgebildet, so wird dieser unter anderem von Wasserstoffbrücken, hydrophoben und ionischen Bindungen stabilisiert. Diese stabilisierenden Bindungen liefern freie Enthalpie, die sogenannte Bindungsenergie ΔG_B, die einen Großteil der für die Reaktion benötigten Energie ausmacht. [19, S.247ff.].

Um die Nutzung dieser Bindungsenergie verstehen zu können, muss die Bildung des Enzymsubstratkomplexes genauer betrachtet werden. Emil Fischer lieferte 1894 mit seiner Schlüssel-Schloss-Theorie den Grundstein dieser Überlegungen. Laut dieser Theorie müsse das Substrat dem Enzym komplementär vorliegen, sodass es in dessen aktives Zentrum binden kann, wie ein Schlüssel in ein Schloss. Ein neueres, von Pauling 1948 dargereichtes Modell, das sogenannte Induced-fit-Modell, zeigt jedoch, dass nicht das Substrat dem Enzym komplementär sein muss, sondern, dass die Struktur des Übergangszustandes dem aktiven Zentrum des Enzymes angepasst sein muss, um eine optimale Wechselwirkung zwischen Enzym und Substrat zu erreichen. Enzyme binden folglich den Übergangszustand leichter als das Substrat bzw. das Produkt, wodurch eine hohe Affinität des Enzyms zum Übergangszustand vorliegt [1][19, S.250ff.].

Es werden bereits zur Bildung des Enzymsubstratkomplexes einige nicht-kovalente Wechselwirkungen zwischen Enzym und Substrat gebildet. Doch erst bei der Ausbildung des Übergangszustandes liegt vollkommene Komplementarität vor und aufgrund der vielen schwachen Bindungen in diesem Zustand wird eine große Menge an Bindungsengerie ΔG_B frei, die dazu befähigt ist, die Aktivierungsenergie der Reaktion herabzusetzen [19, S.250ff.].

Zwischen Substrat und Übergangszustand liegt ein Gleichgewicht vor, ebenso wie zwischen Ausgangssubstanzen und Endstoffen.

Wird der Übergangszustand vermehrt an das aktive Zentrum des Enzyms gebunden, so wird das Gleichgewicht auf Seiten des Übergangszustandes verschoben, was wiederum aufgrund der sich vermehrt im Übergangszustand befindenden Moleküle dazu führt, dass es zu einer beschleunigten Produktbildung kommt und somit die Reaktionsgeschwindigkeit allgemein erhöht wird [22, 142f.].

Zusammenfassend kann man sagen, dass mithilfe der Bindungsenergie, bzw. aufgrund des Bindens des Substrates an ein Enzym, viele Vorteile entstehen, die unter anderem zu einer beschleunigten Reaktion führen. Dazu zählt die eingeschränkte Bewegung des Substrates, das an ein Enzym gebunden ist. Durch die optimale Orientierung von Substraten am Enzym können zwei Substanzen wesentlich schneller miteinander reagieren, weil sie dadurch nicht erst durch Zufall mit dem sich in wässriger Lösung frei bewegenden Reaktionspartner kollidieren müssen, um eine Reaktion auslösen zu können. Außerdem wird ein Substrat bei der Bindung an ein Enzym desolvatisiert, was wiederum zu einer Vereinfachung der Reaktion mit einer weiteren Substanz führt. Außerdem trägt auch der Induced-Fit-Mechanismus von Enzymen zu einer Reaktionsgeschwindigkeitserhöhung bei.

Wie beschrieben handelt es sich dabei um den Mechanismus von Biokatalysatoren, der bei Bindung eines Substrates eine Konformationsänderung auslöst. Diese Änderung der Struktur kann das gesamte Enzym betreffen, oder auch nur auf die das aktive Zentrum umgebenden Strukturteile bezogen sein. Allenfalls werden durch diese Konformationsänderung verschiede funktionelle Gruppen in die für die Katalyse passende Position gebracht, weshalb es wiederrum möglich ist, dass sich weitere schwache Wechselwirkungen zwischen Enzym und Substrat bilden. Dadurch wird eine Menge an Bindungsenergei frei, mithilfe derer die Aktivierungsenergie von Reaktionen gesenkt wird [19, S.250ff.].

8 Mechanismus enzymatischer Reaktionen

Nicht nur die Stabilisierung des Übergangszustandes allein, sondern auch der molekulare Mechanismus einer enzymatisch katalysierten Reaktion, haben Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit.

Enzyme arbeiten im Grunde mit den gleichen Mechanismen, die auch andere organische Katalysatoren verwenden, um die Aktivierungsenergie von Reaktionen zu senken. Jedoch ist ihre Leistung um einiges effektiver, da sie im Laufe der Evolution, unter anderem mit der Eigenschaft der Substratspezifität, stark optimiert worden sind [2, S.361].

Nachstehend werden die Säure-Base-Katalyse, die kovalente Katalyse und die Metallionenkatalyse als enzymatische Mechanismen zur Reaktionsbeschleunigung näher betrachtet. Wichtig ist, dass durch jede dieser Katalysearten sowohl die Hin-, als auch die Rückreaktion gleichermaßen beschleunigt werden.

8.1 Säure-Base-Katalyse

Die Säure-Base-Katalyse ist der häufigste bei Enzymen auftretende Reaktionsmechanismus. Bei dieser Art von Reaktion erfolgt die Beschleunigung aufgrund eines Protonentransfers zwischen Substrat und Enzym während des geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes. Dabei lassen sich immer, wie auch bei anderen organischen Katalysatoren, ein Protonenakzeptor und ein Protonendonator finden [15, S.228f.]. In Enzymen übernehmen diese Funktion, anstelle von schwachen organischen Säuren und Basen, die vor allem um das aktive Zentrum angeordneten Aminosäureseitenketten. Hier sind besonders die Seitenketten der Aminosäuren Asparaginsäure, Glutaminsäure, Histidin, Tyrosin und Lysin zu nennen, deren pK-Werte nahe dem physiologischen Bereich liegen und diese somit als optimale Protonenüberträger während einer katalytischen Reaktion fungieren [2, S.361f.].

Basen dienen als Protonenakzeptoren. Sie ziehen eine positive Ladung von Wasser ab und wandeln dieses zum Hydroxid-Ion, welches als gutes Nucleophil fungiert und somit in weiterer Folge ein elektrophiles Areal des Substrates angreifen kann. Außerdem können Basen durch Aufnahme eines Protons Bindungen wie z.B. O-H, N-H oder C-H spalten [19, S.257]. Säuren haben die Funktion von Protonendonatoren. Im Gegensatz zu Basen erhöhen sie die Elektrophilie des Übergangszustandes, indem sie diesen protonieren [22, S.145].

8.2 Kovalente Katalyse

Bei der kovalenten Katalyse, die bei ca. 20% aller Enzyme Anwendung findet, wird die Aktivierungsenergie einer chemischen Reaktion aufgrund der Bildung eines temporären Intermediats zwischen Enzym und Substrat erniedrigt [15, S.229]. Es kommt zu einer Reaktionsgeschwindigkeitserhöhung, indem ein energetisch günstigerer Reaktionsweg geboten wird.

Bei einer solchen Reaktion dienen bestimmte Aminosäuren, wie z.B. Asparaginsäure, Lysin, Histidin, Cystein und Serin, meist als Nuckleophil, welches mit dem Substrat reagiert, wobei eine kovalente Substrat-Katalysator-Bindung ausgebildet wird [19, S.257f.].

Auch bestimmte Co-Enzyme können in Zusammenarbeit mit dem Apoenzym als kovalente Katalysatoren wirken. In diesem Zusammenhang sind Pyridoxalphosphat und Thiaminpyrophosphat zu nennen [2, 364ff.]. Diese kurzweilige kovalente Bindung zwischen Enzym und Substrat, die nicht zu verwechseln ist mit dem Übergangszustand einer enzymatisch katalysierten Reaktion, aktiviert das Substrat zur Weiterreaktion und wird anschließend durch Wasser gespalten, wodurch das Enzym regeneriert wird und wieder frei vorliegt [22, S.145].

Die von Saccharose-Phosphorylase katalysierte Gruppenübertragungsreaktion von Saccharose zu Glucose-1-phosphat und Fructose bietet sich als Beispiel für eine kovalent katalysierte Enzymreaktion an.

$$Saccharose + P_i \leftrightarrow Glucose - 1 - phosphat + Fructose$$

Im ersten Schritt der Reaktion entsteht ein kovalentes Glucosyl-Enzym-Zwischenprodukt. Der zweite Reaktionsschritt kennzeichnet sich durch die Übertragung der Glucose des Glucosyl-Enzym-Intermediats auf Phosphat (Hinreaktion), oder auf Fructose (Rückreaktion) [15, S.229f.].

$$Saccharose + Enzym \leftrightarrow Glycosyl - Enzym + Fructose$$

$$Glycosyl - Enzym + P_i \leftrightarrow Glucose - 1 - phosphat + Enzym$$

8.3 Metallionenkatalyse

Der Mechanismus der Metallionenkatalyse, der bei ungefähr einem Drittel aller Enzyme zu finden ist, trägt in vielerlei Hinsicht zur Beschleunigung einer chemischen Reaktion bei. Die bei zahlreichen Enzymen im aktiven Zentrum vorhandenen positiv geladenen Übergangsmetallionen Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Mg^{2+} oder Co^{2+}, können sowohl das Substrat im aktiven Zentrum optimal ausrichten, als auch geladene Übergangszustände elektrostatisch stabilisieren [2, S.366]. Außerdem sind Metallionen sehr gute Elektronenleiter und führen bei reversibler Änderung ihrer Oxidationszustände zu Redoxreaktionen [13, S.211ff.].

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Ladung von Metallionen sich in einer Hydrathülle befindendes Wasser acider macht als freies Wasser. Durch die positive Ladung der Metallionen wird das Hydroxidion des Wassers stabilisiert, welches somit als sehr gutes Nucleophil agieren kann [22, S.145f.].

Als Beispiel für ein Enzym, das sich diesem Katalysemechanismus bedient, sei die Carboanhydrase genannt. Dieses Enzym besitzt ein Zn^{2+}-Ion als Cofaktor im aktiven Zentrum und katalysiert die Hydratisierung von CO_2 zu Kohlensäure. Die Carboanhydrase gilt nebenbei als eines der schnellsten Enzyme.

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$

Das neben Histidinresten und Wasser im aktiven Zentrum positionierte Zn^{2+}-Ion bindet das H_2O koordinativ, wodurch ein Hydroxidion entsteht, welches als starkes Nucleophil das enzymgebundene CO_2 angreift und es zum HCO_3^- wandelt. Um das aktive Zentrum wiederherzustellen bindet ein weiteres H_2O-Molekül an das Zn^{2+}-Ion [2, S.366].

9 Einflussfaktoren auf die Enzymaktivität

Im vorherigen Kapitel „Kinetik enzymatischer Reaktionen“ wurde auf den Einfluss von Enzym- und Substratkonzentration auf die Aktivität von Enzymen eingegangen. Zwei weitere Faktoren, Temperatur und pH-Wert, die großen Einfluss auf den Wirkungsgrad von Enzymen zeigen, werden in diesem Abschnitt genauer behandelt.

9.1 Enzymaktivität

Mithilfe der Enzymaktivität kann man auf die Effizienz von Enzymen schließen, ein bestimmtes Substrat innerhalb einer bestimmten Zeit umzusetzen. Sie wird angegeben in einer bestimmten Menge an Substrat, die innerhalb eines definierten Zeitraumes vom Enzym umgesetzt wird [16, S.374f.].

Für diese Aktivität gibt es mehrere geläufige Messgrößen. Die SI-Einheit wird als Katal (kat, [mol*s^{-1}]) bezeichnet und gibt an, wie viele Mol an Substrat ein Enzym innerhalb einer Sekunde umsetzt. Eine weitere sehr verbreitete Einheit stellen die internationalen Enzymeinheiten, die Units (U, [µmol*min^{-1}]), dar, welche die umgesetzte Substratmenge in µmol pro Minute angeben. Folgender Zusammenhang ist essenziell für die Umrechnung von Units in Katal: $1U=16{,}67*10^{-9}$kat [13, S.179ff.].

Möchte man die Aktivität auf ein einzelnes Enzym in reiner Form beziehen, so kann man dessen molekulare Aktivität, auch Wechselzahl genannt, bestimmen. Diese Größe gibt die Anzahl an Substratmolekülen an, die von einem Enzym innerhalb einer Minute umgesetzt wird [4, 68].

Bestimmen kann man die Aktivität von Enzymen, indem man die Verminderung des Substrates, oder das Wachstum des Produktes während einer Reaktion, misst und diese etwa spektroskopisch darstellt. Eine zweite Möglichkeit stellt die Einführung eines weiteren Reaktionsschrittes dar. So wird z.B. ein nicht spektroskopisch messbares Produkt mittels $NADP^+$ bzw. NADPH umgesetzt, welches in einem anschließenden optischen Test genau bestimmt werden kann und so wiederum Rückschluss auf die Aktivität des untersuchten Enzyms liefert [13, S.179ff.].

Passende Experimente zu diesem Kapitel sind in Kapitel 22.3 zu finden (Abhängigkeit der Katalaseaktivität von der Substratkonzentration; Bestimmung der Wechselzahl am Beispiel der Katalase).

9.2 Abhängigkeit der Enzymaktivität vom pH-Wert

Ein Großteil der Enzyme besitzt ein bestimmtes pH-Optimum, welches meist unweit des physiologischen pH-Wertes von 7 liegt. Einige Extreme arbeiten bei durchaus niedrigem pH-Wert, wie z.B. das Pepsin, ein Peptidbindungen hydrolysierendes Enzym des Magens, welches durch ein pH-Optimum von ca. 2 charakterisiert wird. Im Gegensatz dazu weist das Trypsin, eine Peptidase des Dünndarms, ein pH-Optimum von ca. 8 auf [13, S.181].

Das charakteristische pH-Optimum einzelner Enzyme ist auf deren biochemischen Aufbau zurückzuführen. Vor allem die im aktiven Zentrum, aber auch die außerhalb des katalytisch wirksamen Bereiches liegenden Aminosäureseitenketten können teilweise als schwache Säuren, bzw. schwache Basen wirken und stehen somit sowohl zur Protonierung, als auch zur Deprotonierung zur Verfügung. Bei einer Änderung des pH-Wertes der Umgebung kommt es infolgedessen zu einer Ladungsänderung ionisierbarer Gruppen des Enzyms. Sind viele basische Aminosäuren, wie z.B. Histidin, am Aufbau des Enzymgerüsts beteiligt, so wird das pH-Optimum des Enzyms im basischen Bereich liegen. Umgekehrt dazu verlangen saure Aminosäuren, wie Asparaginsäure, eine saure Umgebung, um hohe Wirksamkeit zeigen zu können. Aufgrund dieser Zusammenhänge kann eine pH-Wert-Änderung zu einer Hemmung des Enzyms führen, indem die Ladungsverteilung katalytisch aktiver Gruppen geändert wird, bzw. es aufgrund der variierten Ladungsverteilung zu einer allgemeinen Konformationsänderung des Enzyms kommt. Bei einer extremen Änderung des pH-Wertes kommt es zur Inaktivierung von Enzymen aufgrund von Denaturierung [12, S.69f.][13, S.181].

Stellt man den Einfluss des pH-Wertes auf die Enzymaktivität graphisch dar, indem man die Aktivität gegen den pH-Wert aufträgt, so erhält man eine symmetrische Glockenkurve [18, S.78f.].

Das zu diesem Kapitel passende Experiment „pH-Abhängigkeit des Stärkeabbaus durch die Mundspeichel-Amylase“ ist in Kapitel 22.1 zu finden.

9.3 Abhängigkeit der Enzymaktivität von der Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Aktivität von Enzymen zeigt sich, im Gegensatz zur pH-Abhängigkeit, nicht symmetrisch, sondern kann durch die sogenannte RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel) beschrieben werden. Diese Regel besagt, dass es bei einer Erhöhung der Umgebungswärme um 10°C zu einer Verdoppelung der Enzymaktivität kommt. Jedoch werden ab einer bestimmten Temperatur, die bei den meisten Enzymen bei >50°C liegt, diese durch die Hitze so stark beansprucht, dass sie denaturieren und somit ihre katalytische Aktivität abrupt absinkt. Während das Temperaturoptimum der meisten Enzyme bei ungefähr 40°C liegt, gibt es einige thermophile Bakterien, deren Enzyme bei einer Umgebungstemperatur von 100°C nicht an Aktivität verlieren. [13, S.181][18, S.78f.].

Das zu diesem Kapitel passende Experiment „Hohes Fieber – Denaturierung des Enzyms Katalase durch Hitze“ ist in Kapitel 22.3 zu finden.

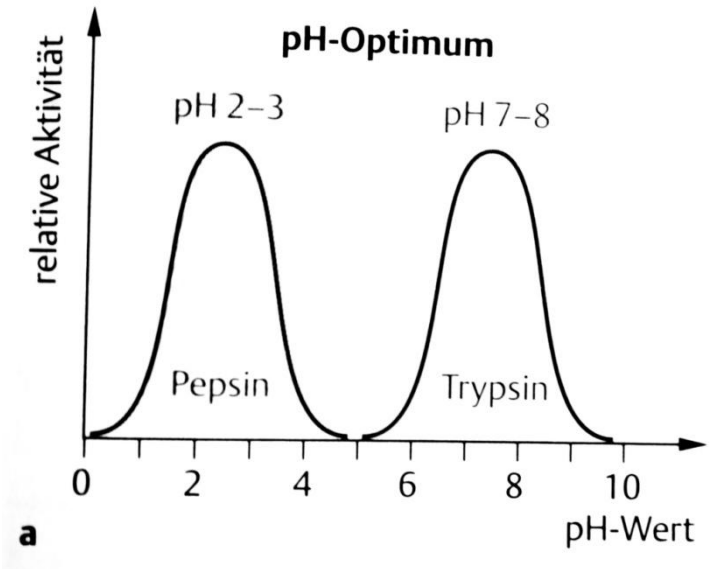


Abbildung 11: Abhängigkeit der Enzymaktivität vom pH-Wert. Aspartatreste des Pepsins im aktiven Zentrum verlangen einen niedrigeren pH-Wert der Umgebung, als die sich im katalytischen Zentrum des Trypsins befindenen Histidinreste [13, S.181].

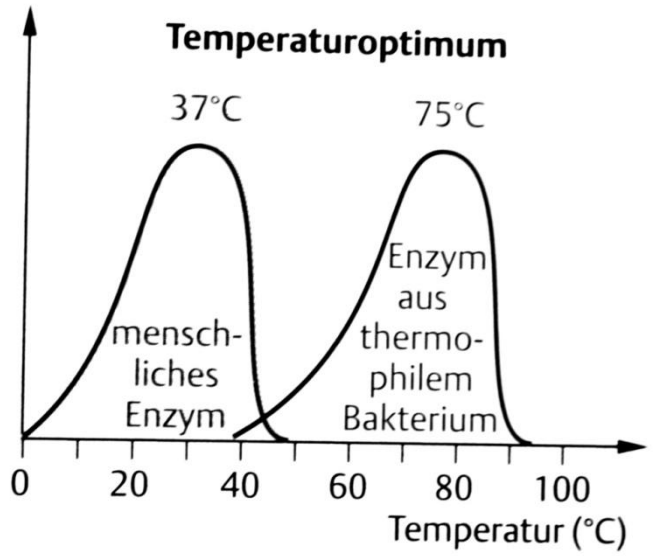


Abbildung 12: Abhängigkeit der Enzymaktivität von der Temperatur. Charakteristische Temperaturoptima sind abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen des Enzyms [13, S.181].

10 Kinetik enzymatischer Reaktionen

Die Enzymkinetik beschäftigt sich mit der Reaktionsgeschwindigkeit enzymkatalysierter Prozesse, im Zusammenhang mit der Konzentration von Enzym und Substrat. Die Substratkonzentration beeinflusst die Geschwindigkeit einer Reaktion maßgeblich, jedoch ist es relativ schwierig, diesen Einfluss auf eine Reaktion zu ermitteln, da sich die Substratkonzentration während einer solchen ständig verändert [19, S.260].

Adrian Brown war der Erste, der sich mit Enzymkinetik auseinandergesetzt hat. Er entwickelte 1902 eine Theorie zur Hydrolysegeschwindigkeit der Saccharose, katalysiert durch β-Fructofuranosidase, die besagt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig von der Saccharosekonzentration ist, solange diese in großem Überschuss vorliegt. Brown kam bereits zur Annahme, dass eine enzymkatalysierte Reaktion nach nachstehendem Schema abläuft, welches später von Michaelis und Menten als Prinzip der Zwischenstoffkatalyse vorgestellt worden ist.

$$E + S \ \overrightarrow{k1} \ ES \ \overrightarrow{k2} \ EP \ \overrightarrow{k3} \ E + P$$

Hier stellt E das Enzym, S das Substrat, ES den Enzymsubstratkomplex und P das Produkt dar. Ein jeder Reaktionsschritt wird durch eine Geschwindigkeitskonstante beschrieben.

Für die Hinreaktion sind dies die Konstanten k_1, k_2 und k_3, währen k_{-1}, k_{-2} und k_{-3} die Rückreaktion charakterisieren [2, S.399f.].

Michaelis und Menten formulierten anhand obiger Formel einen mathematischen Zusammenhang, mittels diesem die Reaktionsgeschwindigkeit enzymkatalysierter Reaktionen erfasst werden kann. Dazu wurden einige Vereinfachungen des allgemeinen Reaktionsschemas eines durch ein Enzym katalysierten Prozesses getroffen, welche für die meisten Enzyme zutreffend sind.

Eine Simplifizierung ist das Zusammenlegen der letzten beiden Teilschritte der allgemeinen Reaktionsgleichung zu einem. Außerdem wird angenommen, dass die Rückreaktion des freien Enzyms mit dem Produkt zum Enzymsubstratkomplex irreversibel und dadurch zu vernachlässigen ist. Somit dient folgende Reaktion als Ausgangsschritt für die weiteren Überlegungen zu Reaktionskinetik [23, S.17ff.]:

$$E + S \ \overrightarrow{k1} \ ES \ \overrightarrow{k2} \ E + P$$

Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich bei den meisten enzymatischen Reaktionen innerhalb weniger Millisekunden ein Fließgleichgewicht einstellt, in diesem die Konzentration des Enzym-Substrat-komplexes konstant vorliegt. Briggs hat diesen stationären Zustand 1924 erstmals dargestellt, nach dessen Annahme die Initialgeschwindigkeit proportional zu diesem gleichbleibenden [ES] ist [21, S.242ff.].

$$v = \ k_2 \ [ES]$$

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Verhältnis zwischen Enzym- und Substratkonzentration. Die Konzentration an Enzym ist im Vergleich zur Konzentration an Substrat zu vernachlässigen. Aufgrund der großen Menge an vorhandenem Substrat, ändert sich bei der Bildung des Enzymsubstratkomplexes nur die Konzentration an freiem Enzym, nicht aber die des Substrates. Die Gesamtenzymkonzentration setzt sich somit aus der freien Enzymmenge und der im Enzymsubstratkomplex gebundenen Menge an Enzym zusammen. Bei einer im Überschuss vorhandenen Substratmenge liegt das gesamte Enzym in gebundener Form vor, was bedeutet, dass die Reaktion zu diesem Zeitpunkt mit Maximalgeschwindigkeit abläuft, die selbst durch Erhöhung der Substratkonzentration nicht mehr gesteigert werden kann [2, S.400ff.].

$$[E]_t = [E] + \ [ES]$$

$$V = \ k_2 \ [E]_t$$

Eine besonders wichtige Größe ist die sogenannte Michaelis-Konstante K_M, welche die Geschwindigkeitskonstanten der allgemeinen Reaktionsgleichung als Resultante in folgender Formel zusammenfasst [23, S.17ff.]:

$$K_M = \frac{k_{-1} + k_{+2}}{k_{+1}}$$

Für die meisten enzymatischen Reaktionen gilt, dass die durch das k_2 beschriebene Reaktion als geschwindigkeitsbestimmend angesehen werden kann, da das k_2 meistens einen viel geringeren Wert aufweist als das k_{-1} und es somit beim ersten Schritt der Reaktion zur Ausbildung eines Gleichgewichts kommt.

Folglich gilt, mit K_S als Dissoziationskonstante des ersten Reaktionsschrittes einer enzymkatalysierten Reaktion [2, S.400ff.]:

$$K_S = \frac{K_{-1}}{K_{+1}} = \frac{[E][S]}{[ES]}$$

Bringt man diese Vereinfachungen der allgemeinen Reaktionsgleichung einer enzymkatalysierten Reaktion in einen mathematischen Zusammenhang, so ergibt sich die von Michaelis und Menten aufgestellte und nach ihnen benannte Gleichung.

$$v = \frac{V * [S]}{k_M + [S]}$$

Mit diesem mathematischen Ausdruck wird die Abhängigkeit der Initialgeschwindigkeit von der Enzym- und der Substratkonzentration dargestellt [23, S.17ff.].

10.1 Bedeutung der Michaelis-Konstanten K_M

Ist K_M = [S], so lässt sich die Michaelis-Menten-Gleichung in $v = \frac{V_{max}}{2}$ umformen. Somit wird klar, dass K_M als diejenige Substratkonzentration definiert werden kann, bei dieser die Geschwindigkeit der Reaktion halbmaximal ist. Jedes Enzym-Substrat-Verhältnis besitzt einen eigenen K_M-Wert, der neben dem Enzym und dem Substrat selbst auch pH- und temperaturabhängig ist.

Ist $K_M = K_S$, so kann man daraus auf die Affinität zwischen Enzym und Substrat schließen, wobei ein niedriger K_M-Wert kennzeichnend ist für eine hohe Affinität zwischen Enzym und Substrat. Die Michaeliskonstante besitzt neben den Eigenschaften einer Substratkonzentration auch dessen Einheit mol/l [2, S.403f.][22, S.156ff.][23, S.17ff.].

Dadurch, dass K_M als Substratkonzentration bei halbmaximaler Geschwindigkeit definiert wird, kann man anhand dieser Konstante abschätzen, wie viel Substrat notwendig ist, um die Maximalgeschwindigkeit zu erreichen. So weiß man z.B., dass bei einer Substratkonzentration von 8* K_M erst 80% der maximalen Geschwindigkeit ausgenützt sind [23, S.17ff.].

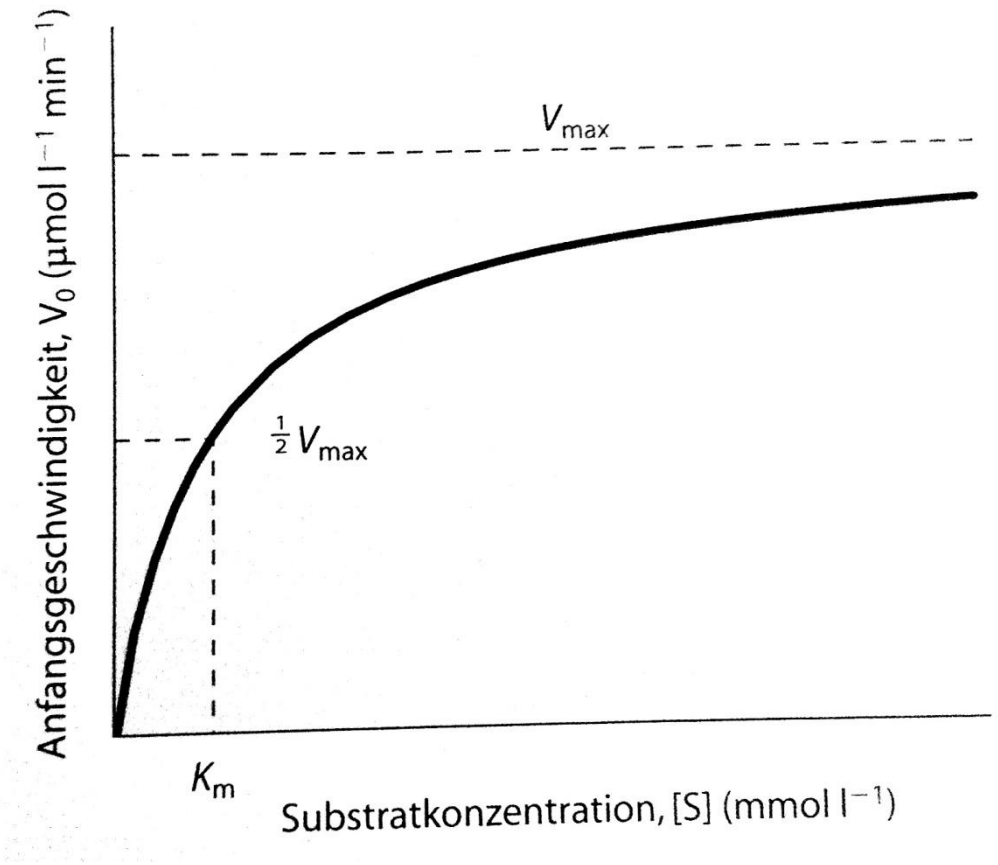


Abbildung 13: Abhängigkeit der Initialgeschwindigkeit enzymatischer Reaktionen von der Substratkonzentration [19, S. 261].

In Abb. 13 wird die Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit enzymatischer Reaktion von der Substratkonzentration graphisch dargestellt. Es gilt, dass sich die Geschwindigkeit bei niedriger Substratkonzentration proportional zu dieser verhält, da unter diesen Bedingungen ein Großteil der Enzyme in freier Form und nicht als Enzym-Substrat-Komplex vorliegt. Die halbmaximale Geschwindigkeit ist erreicht, wenn sich die Hälfte der Enzyme in gebundener Form befindet, während der Rest als freie Enzyme vorliegt. Bei halbmaximaler Geschwindigkeit gilt [S] = K_M.

Je höher die Substratkonzentration, desto schneller verläuft die Reaktion. Die maximale Geschwindigkeit wird erreicht, wenn die gesamte Menge an Enzym vollständig als Enzym-Substrat-Komplex gebunden vorliegt, und kein freies Enzym vorhanden ist, welches eine Umsetzung eines Substrates bewerkstelligen könnte. In diesem Fall kann eine Erhöhung der Substratkonzentration die Reaktionsgeschwindigkeit nicht mehr steigern. Bei dieser Art der Darstellung ist es allerdings nur theoretisch möglich, die Maximalgeschwindigkeit zu erreichen, praktisch kann diese maximale Geschwindigkeit jedoch nur errechnet und nie erlangt werden. Um v_{max} und K_M genau bestimmen zu können muss man eine alternative Auftragung wählen [19, S.260ff.].

Es gibt neben der Variante der Darstellung als Hyperbel aufgrund der Auftragung der Geschwindigkeit gegen die Substratkonzentration noch verschiedene weitere Möglichkeiten die Michaelis-Menten-Gleichung zu verkörpern. Bei einem hyperbolischen Kurvenverlauf kann man die Werte für v_{max} und K_M nur sehr ungenau ablesen, was man mit verschiedenen anderen Linearisierungsverfahren übergehen kann. Die häufigste Anwendung der Linearisierungsverfahren findet die Lineweaver-Burk-Auftragung. Für diese alternative Form der Darstellung wird der Kehrwert der Michaelis-Menten-Gleichung gebildet und der Kehrwert der Initialgeschwindigkeit gegen den Kehrwert der Substratkonzentration aufgetragen, wodurch eine lineare Funktion entsteht. Diese Linearität führt zu einer genaueren Charakterisierung von v_{max} und K_M [13, S.189f.].

$$\frac{1}{v_0} = \frac{K_M}{v_{max}} * \frac{1}{[S]} + \frac{1}{v_{max}}$$

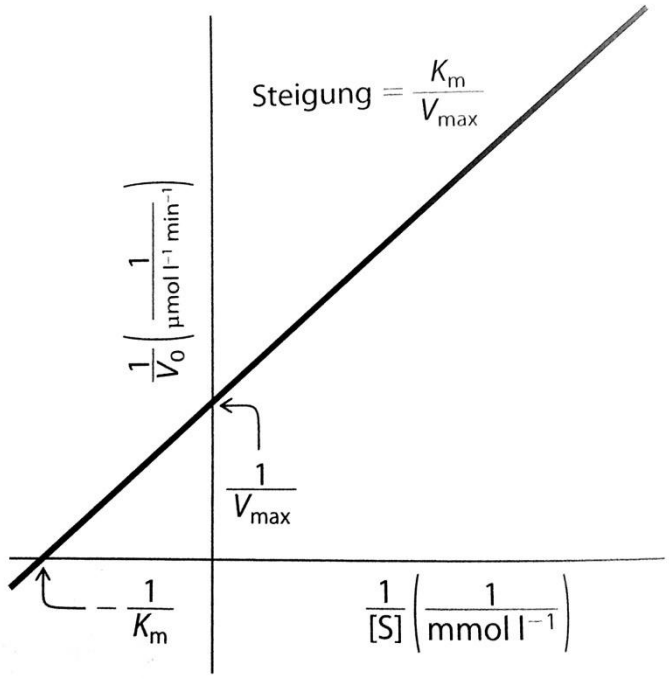


Abbildung 14: Lineweaver-Purk-Darstellung der Michaelis-Menten-Gleichung [19, S. 264].

10.2 Sigmoide Reaktionskinetik

Die Sättigungskinetik der meisten Enzyme zeichnet, wie in Abb. 13 dargestellt, eine Hyperbel. Es gibt jedoch auch eine gewisse Klasse an Enzymen, die eine sigmoide Sättigungskinetik aufweisen. Bei diesen Enzymen handelt es sich um allosterische Biokatalysatoren, die aus mehreren enzymatischen Untereinheiten konstruiert sind. Diese wirken auf sich gegenseitig in dieser Hinsicht ein, dass die Bindung eines Substrates an eine Untereinheit die Bindung eines weiteren an eine zweite enzymatische Einheit positiv beeinflusst. Auf allosterische Enzyme wird im Kapitel „Regulation der Enzymaktivität“ genauer eingegangen [23, S.21].

11 Regulation der Enzymaktivität

Da Enzyme als Biokatalysatoren Stoffwechselprozesse in Organismen beschleunigen, ist es besonders wichtig, dass diese reguliert werden können. Diese Eigenschaft von Enzymen macht es möglich, jene zum gewünschten Zeitpunkt zu aktivieren, bzw. zu deaktivieren, um einen geregelten Verlauf der sich in einem Individuum ereignenden biochemischen Prozesse zu gewährleisten. Die Aktivität von Enzymen wird somit auf die ständig variierenden Gegebenheiten im Stoffwechsel angepasst. Lebewesen verfügen über unterschiedliche Optionen, diese Regulation der körpereigenen Enzyme durchzuführen.

11.1 Regulation der Verfügbarkeit von Enzymen

Eine Möglichkeit zur Regelung der Enzymaktivität liegt in der Regulation der Neubildung, bzw. des Abbaus von Enzymen. Enzyme gehören der Klasse der Proteine an und bestehen in ihrem Grundgerüst aus Aminosäuren, deren Abfolge wiederum einem genetischen Code entspringt. Zellen besitzen die Fähigkeit, bestimmte Gene an- oder auszuschalten, und somit die Synthese von Enzymen zu regulieren, sodass je nach Bedarf eine optimale Konzentration an adäquatem Enzym vorhanden ist. Diese relativ langwierige Anpassung an Umgebungsfaktoren führt dazu, dass die Aktivität von Enzymen je nach Individuum, Alter und Geschlecht variiert [5, S.74ff.]. Als Veranschaulichung dieses Mechanismus soll die Wirksamkeit der Alkoholdehydrogenase dienen. Dieses Enzym, welches der Verstoffwechslung von Ethanol dient, zeigt einen deutlichen Geschlechtsdimorphismus. Die Konzentration an Alkoholdehydrogenase ist vor allem in der Leber sehr hoch. Ethanol gelangt durch Resorption über den Darm zu diesem Ort seines Abbaus. Im männlichen Organismus wurde dieses Enzym jedoch zusätzlich bereits im Magen identifiziert. Diese Gegebenheit führt dazu, dass Männer, im Gegensatz zu Frauen, Ethanol teilweise bereits vor dem Übergang in den Blutkreislauf abbauen können, und somit im Vergleich zu Frauen meist mehr Alkohol zu sich nehmen können [24, S.36ff.].

Eine schnellere Variante zur Steuerung der Enzymaktivität stellt das Einwirken von Aktivatoren und Inhibitoren dar. Als Aktivatoren werden Substanzen bezeichnet, die eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit herbeiführen. Viele Enzyme benötigen solche Aktivatoren, um wirken zu können. Beispiele für diese sich positiv auf die Enzymaktivität auswirkenden Substanzen sind unter anderem Ionen wie K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} oder verschiedene Aminosäuren, bzw. der Energieträger Adenosintriphosphat.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Inhibitoren um Stoffe, die Reaktionen durch ihr Wirken verlangsamen [5, S.74ff.][11, S.422ff.].

11.2 Regulation der Enzymaktivität mittels Inhibitoren

Inhibitoren können die Aktivität von Enzymen entweder reversibel, oder irreversibel hemmen und somit deren Reaktionsgeschwindigkeit enorm erniedrigen oder die Reaktion vollständig zum Stillstand bringen. Als Beispiel für irreversible Hemmstoffe seien Schwermetall-Ionen wie Pb^{2+} und Hg^{2+} genannt, die das Enzym inhibieren, indem sie an funktionelle Gruppen, wie SH- und OH-Gruppen, des katalytischen Zentrums binden und dieses dahingehend modifizieren, dass es für das Substrat keine komplementäre Andockstelle mehr darstellt. Eine solche Reaktion kann folgendermaßen dargestellt werden [11, S.422ff.]:

$$Protein - SH + Pb^{2+} + HS - Protein \rightarrow Protein - S - Pb - S - Protein + 2H^{+}$$

Außerdem zeigt eine Reihe von Arzneistoffen die Wirkungsweise eines irreversiblen Hemmstoffes. Ein Exempel stellt das Aspirin dar, welches die Cyclooxygenase, ein Enzym zur Synthese von Prostaglandinen, inhibiert. Dadurch wird dieser die Schmerzempfindlichkeit steigernder und bei Entzündungen in erhöhter Konzentration auftretender Stoff in geringerem Maße vom Organismus produziert [25, S.39].

Die häufiger auftretende Form der Inhibition ist jedoch reversibel. Einige verschiedene Mechanismen reversibler Hemmungen der Enzymaktivität werden nachstehend genauer betrachtet.

Das passende Experiment zu diesem Kapitel „Lebervergiftung – Blockade des Enzyms Katalase durch Schwermetallionen“ ist in Kapitel 22.3 zu finden.

11.2.1 Kompetitive Hemmung der Enzymaktivität

Eine kompetitive Hemmung der Aktivität von Biokatalysatoren kommt aufgrund sogenannter Substratanaloga zustande. Hierbei handelt es sich um Hemmstoffe, die eine ausgeprägte strukturelle Ähnlichkeit mit dem eigentlich umzusetzenden Substrat aufweisen und somit mit diesem um die Bindungsstelle im aktiven Zentrum eines Enzyms konkurrieren. Bei einer an das katalytische Zentrum gebundenen Hemmsubstanz ist es dem Enzym nicht möglich, eine Umsetzung durchzuführen. Aufgrund dieser Gegebenheiten lässt sich ein kompetitiver Inhibitor als eine Substanz beschreiben, die aufgrund ihrer Bindung an das Enzym die Konzentration an mit Substrat gekoppeltem Enzym verringert.

Somit wird die allgemeine Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Der Grad der Aktivitätshemmung ist folglich abhängig vom Konzentrationsverhältnis zwischen Substrat und Inhibitor.

Dies hat wiederum zur Folge, dass eine hohe Substratkonzentration die kompetitive Inhibition aufzuheben vermag [26, S.74].

Eine allgemeine Reaktionsgleichung für eine kompetitiv gehemmte Reaktion kann mittels folgender Gleichungen aufgestellt werden, wobei I den Inhibitor und EI den Enzyminhibitor-Komplex darstellen:

$$E + S \leftrightarrow ES \rightarrow E + P$$

$$E + I \leftrightarrow EI$$

Betrachtet man die Michaelis-Menten-Gleichung einer kompetitiv inhibierten Reaktion, so erkennt man, dass die Hemmung keinerlei Auswirkung auf die Maximalgeschwindigkeit hat. Die Geschwindigkeit der Umsetzung des Enzym-Substrat-Komplexes in das Produkt variiert nicht, lediglich [ES] wird verringert. Aufgrund einer allgemeinen Reduzierung der Affinität des Enzyms zum umzusetzenden Substrat, erhöht sich bei einer kompetitiven Hemmung allerdings das K_M, was bedeutet, dass eine höhere Substartkonzentration vorliegen muss, um die halbmaximale Geschwindigkeit zu erreichen [13, S.191ff.].

Die Michaelis-Menten-Gleichung wird um die Größe α erweitert, welche eine Funktion der Inhibitorkonzentration und der Affinität des Inhibitors zum Enzym darstellt. Dieser Faktor gibt an, um wie viel sich K_M aufgrund der Inhibition erhöht.

Die Michaelis-Menten-Gleichung für eine kompetitiv gehemmte enzymatische Reaktion kann folgendermaßen dargestellt werden [2, S.410ff.]:

$$v = \frac{v_{max} * [S]}{\alpha K_M + [S]} \qquad \alpha = 1 + \frac{[I]}{K_I}$$

In der nachstehenden Abbildung wird eine kompetitiv inhibierte Reaktion im Vergleich zu einer unter gewöhnlichen Bedingungen ablaufenden Reaktion dargestellt.

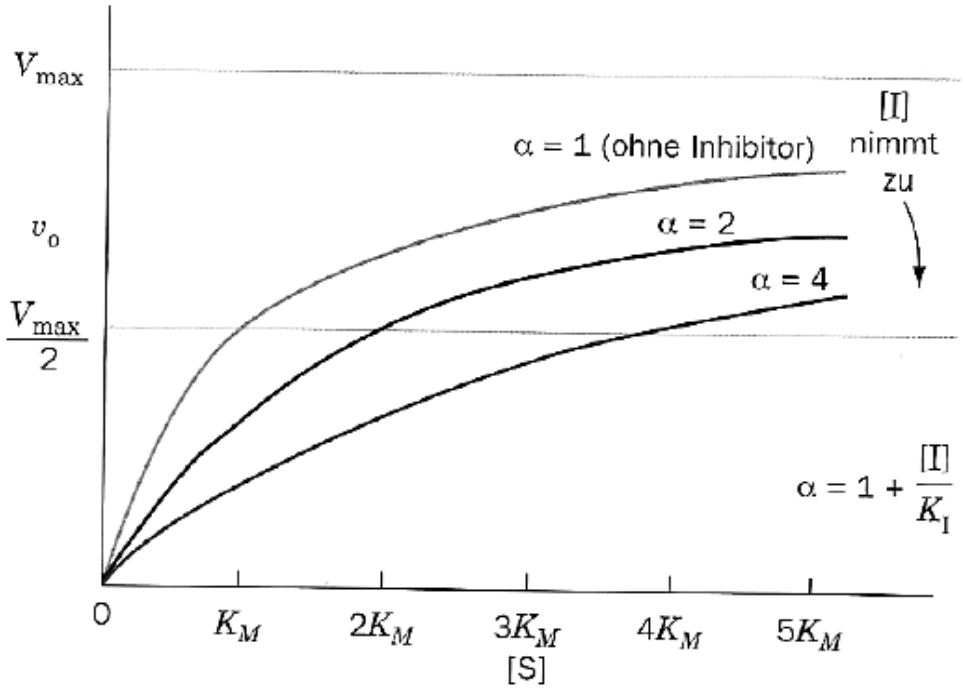


Abbildung 15: Auftragung von v0 gegen [S] für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines kompetitiven Inhibitors [2, S.412].

Praktisch wird die kompetitive Enzymhemmung zur Behandlung einer Methanolvergiftung eingesetzt. Methanol wird im Organismus mittels Alkoholdehydrogenase zu den stark toxischen Substanzen Formaldehyd und Ameisensäure abgebaut. Auch Ethanol kann sich an das aktive Zentrum der Alkoholdehydrogenase binden und somit die Umsetzung des Methanols blockieren, was zur Senkung der Konzentration an toxischen Metaboliten führt. Diese Methode ist besonders wirksam, da Ethanol eine viel höhere Affinität zur Alkoholdehydrogenase aufweist, als das Methanol und dadurch von dieser zu 90% eher umgesetzt wird als zweitgenanntes [27, S.576].

11.2.2 Unkompetitive Hemmung der Enzymaktivität

Eine unkompetitive Inhibition der Aktivität von Enzymen wird durch die Bindung einer Hemmsubstanz an den Enzymsubstratkomplex charakterisiert. Durch die Zusammenlagerung von Enzym und Substrat entsteht aufgrund einer geringfügigen Konformationsänderung am Enzym eine weitere Bindungsstelle, die sich nicht zwingend im aktiven Zentrum des Biokatalysators befinden muss.

An diesen Ort kann nun eine Hemmsubstanz binden, die im Gegensatz zur kompetitiven Inhibition keine strukturelle Ähnlichkeit mit dem Substrat aufweisen muss [13, S.194f.].

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass unkompetitive Inhibitoren zwar die katalytische Wirksamkeit von Enzymen negativ beeinflussen, aber keinen Einfluss auf die Substratbindung ausüben. Somit ist es nicht möglich, diese Art der Hemmung mittels hoher Substratkonzentration aufzuheben [22, S.162f.].

Nachstehend wird das allgemeine Reaktionsschema dieses bei Enzymen mit mehreren Substraten auftretenden Hemmtypus dargestellt:

$$E + S \leftrightarrow ES \rightarrow E + P \qquad ES + I \leftrightarrow ESI$$

ESI ist kennzeichnend für den Enzym-Substrat-Inhibitor-Komplex, welcher nicht in ein Produkt übergehen kann [13, S.194f.].

Die Dissoziationskonstante für die Bindung des Inhibitors wird wie folgt beschrieben:

$$K_I = \frac{[ES][I]}{[ESI]}$$

Die Michaelis-Menten-Gleichung einer solchen unkompetitiv gehemmten Reaktion zeigt, dass aufgrund der Verminderung der Konzentration an [ES] durch die Bindung des Inhibitors sowohl die Maximalgeschwindigkeit, als auch das K_M verringert werden.

$$v = \frac{v_{max}\,[S]}{K_M + \alpha * [S]}$$

Nachstehende Abbildung soll den Unterschied zwischen einer unkompetitiv inhibierten Reaktion und einer unter normalen Bedingungen ablaufenden Katalyse anhand eines Lineweaver-Burk-Diagrammes veranschaulichen. Hierbei ist sehr gut zu erkennen, dass das Verhältnis zwischen der Michaelis-Konstante und der Maximalgeschwindigkeit durch die Hemmung nicht beeinflusst wird und lediglich K_M und V_{max} reduziert werden [2, S.414f.].

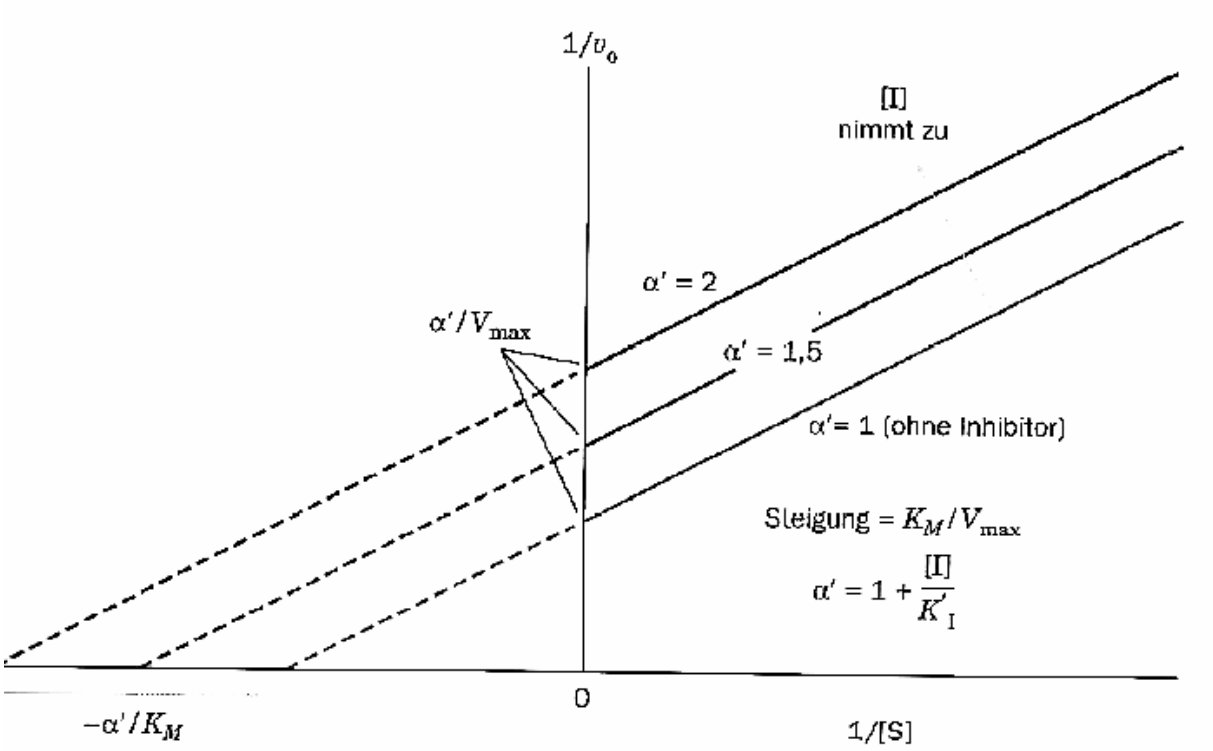


Abbildung 16: Lineweaver-Burk-Diagramm für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines unkompetitiven Inhibitors [2, S.415].

11.2.3 Nichtkompetitive Hemmung der Enzymaktivität

Die nichtkompetitive Inhibition, auch als gemischte Hemmung bezeichnet, zeichnet sich dadurch aus, dass sie sowohl auf die Substratbindung, als auch auf die katalytische Aktivität des Enzyms einen Einfluss ausübt [2, 415ff.]. Bei diesem Hemmtypus, der vorrangig bei Enzymen mit mehreren Substraten Anwendung findet, bindet der Inhibitor sowohl an das freie Enzym, als auch an den Enzym-Substrat-Komplex. Aufgrund dieser Gegebenheiten kann man sich das allgemeine Reaktionsschema folgendermaßen vorstellen [13, S.195f.]:

$$E + I \leftrightarrow EI \qquad ES + I \leftrightarrow ESI$$

Eine Variante der nichtkompetitiven Hemmung wirkt sich nur auf die katalytische Aktivität des Enzyms aus und lässt die Substratbindung unbeeinflusst. Dieser Hemmtypus, bei dem sich lediglich die Maximalgeschwindigkeit verringert, K_M allerdings konstant bleibt, bezeichnet man als reine nichtkompetitive Hemmung. Bei einer weiteren Form der nichtkompetitiven Inhibition wird auch die Substrataffinität negativ oder positiv beeinflusst, infolgedessen die Michaelis-Konstante K_M erhöht bzw. erniedrigt wird [2, S.415ff.].

Ebenso wie die unkompetitive Hemmung kann man diese Form der Inhibition nicht mit einer hohen Substratkonzentration übergehen [21, S.251ff.].

Die Michaelis-Menten-Gleichung einer nichtkompetitiv gehemmten Reaktion lässt sich wie folgt aufstellen:

$$v = \frac{v_{max}\,[S]}{\alpha K_M + \alpha'[S]}$$

Im nachstehenden Diagramm wird ein Michaelis-Menten-Enzym in Gegenwart eines nichtkompetitiven Inhibitors mittels Lineweaver-Burk-Auftragung dargestellt. Auffällig ist hierbei, dass sich die Geraden im negativen Bereich schneiden. Die Koordinaten des Schnittpunktes sind in der Grafik innerhalb der eckigen Klammern angegeben [2, S. 417f.].

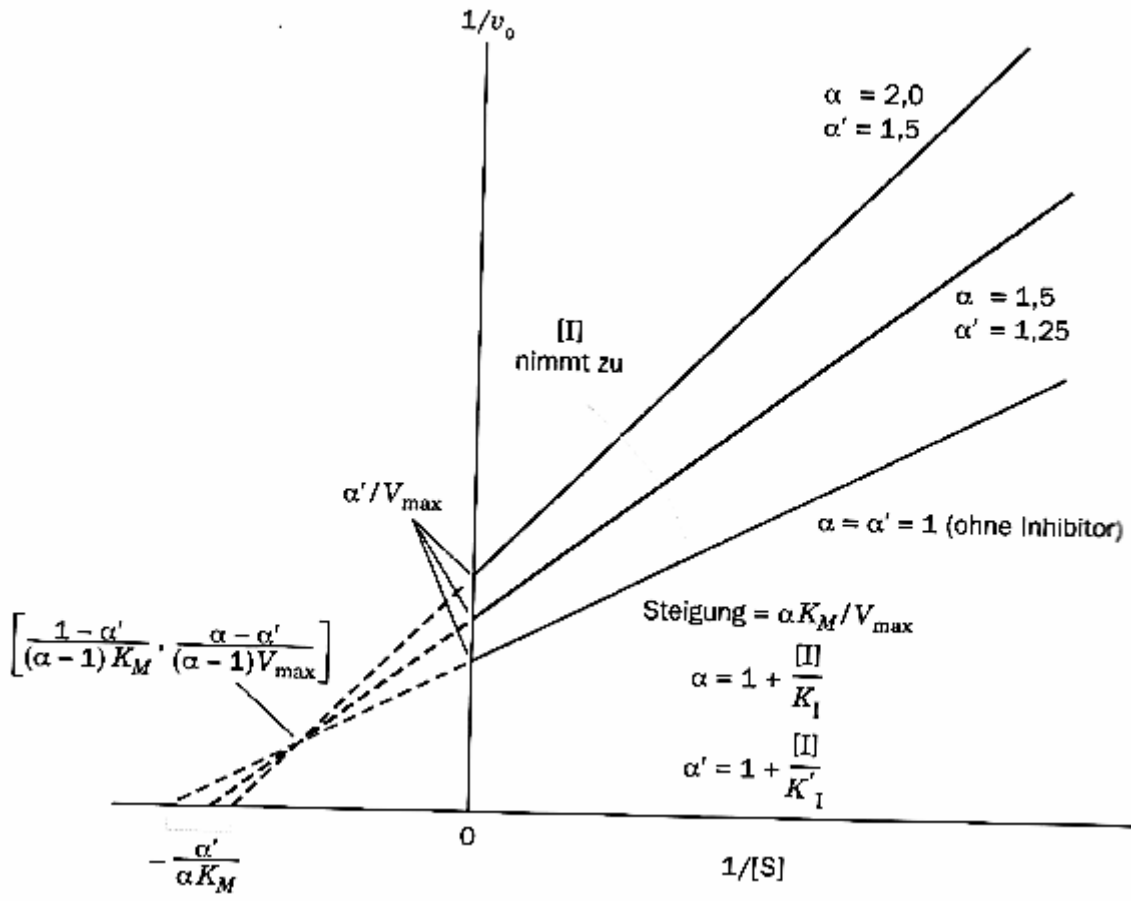


Abbildung 17: Lineweaver-Burk-Diagramm für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines nichtkompetitiven Inhibitors [2, S.418].

11.3 Allosterische Regulation der Enzymaktivität

Die mit Abstand schnellste Möglichkeit die Aktivität von Enzymen zu regulieren, stellt die Einwirkung von allosterischen Effektoren dar. Allosterische Enzyme bestehen meist aus zwei oder mehreren katalytischen Untereinheiten und besitzen zusätzlich zu den aktiven Zentren mindestens ein regulatorisches Zentrum. Diese Stelle verkörpert den Bindungsort für verschiedene Effektoren, die sowohl als Aktivatoren positiven, aber auch als Inhibitoren negativen Einfluss auf die Enzymaktivität ausüben können. Diese Effektoren, bei denen es sich z.B. um ein weiteres Substrat, das Reaktionsprodukt, einen Cofaktor oder einen Metaboliten eines weiteren Stoffwechselweges handelt, führen durch ihre Bindung zu einer Konformationsänderung am Enzym. Durch diese strukturelle Änderung kann sowohl die katalytische Wirksamkeit des Biokatalysators, als auch die Affinität zwischen Enzym und Substrat beeinflusst werden [28, S.30ff.].

Eine solche allosterische Regulation, die in der Regel vollkommen reversibel ist, führt also zu einer Stabilisation einer bestimmen Konformation des Enzyms. Aktivatoren stabilisieren den aktiven R-Zustand eines Enzyms, während Inhibitoren die Ausbildung des für Substrate nicht attraktiven T-Zustand fördern [29, S.65ff.].

Besonders interessant ist, dass allosterische Enzyme nicht der Michaelis-Menten-Kinetik folgen, sondern eine sigmoide Sättigungskurve aufweisen. Vergleicht man eine solche allosterische Reaktion mit einer Reaktion nach Michaelis-Menten, so ist zu erkennen, dass bei allosterischen Reaktionen ein K_M stetig mit einer Veränderung der Substratkonzentration variieren würde und somit nicht in das Michaelis-Menten-Schema einzuordnen ist [28, S.30ff.].

Allosterischen Enzymen wird aufgrund ihrer Rückkoppelungshemmung eine große physiologische Bedeutung zugeschrieben. Die einzelnen katalytischen Untereinheiten wirken untereinander als Aktivatoren bzw. Inhibotoren. Die Cholesterol-Biosynthese soll diesen Mechanismus veranschaulichen. Eine hohe Konzentration des Produkts Cholesterol hemmt den ersten enzymatischen Reaktionsschritt dieses Stoffwechselweges. Ist das Produkt allmählich verbraucht, so wird dieses Enzym wieder aktiviert und die Synthese folglich abermals zu starten [29, S.67].

11.4 Kovalente Modifikation zur Regulation der Enzymaktivität

[13, S.201][28, S.30ff.]

Die kovalente Modifikation stellt eine chemische Variante dar, Enzyme innerhalb kürzester Zeit reversibel zu regulieren. Kennzeichnend für diesen Mechanismus ist die kovalente Bindung funktioneller Gruppen an ein Enzym, welche zu einer Konformationsänderung führt. So wird z.B. ein inaktiv an seinem Wirkungsort vorliegendes Enzym erst durch ein weiteres, aktivierendes Enzym in seine wirksame Form überführt. Die am häufigsten auftretenden Typen dieser Art der Enzymregulierung sind die ATP-abhängige Phosphorylierung von Enzymen durch eine Proteinkinase, bzw. eine Dephosphorylierung durch eine Phosphatase.

Kovalente Modifikationen können sich allerdings nicht nur positiv, sondern auch negativ auf die Aktivität von Enzymen auswirken. So wird die Glycogen-Phosphorylase durch eine Phosphorylierung aktiviert, während eine solche für die Glycogen-Synthase negative Auswirkungen hat.

Im Bezug auf die Michaelis-Menten-Gleichung können bei diesem Regulationstypus sowohl die Maximalgeschwindigkeit, als auch die Michaelis-Konstante in positiver und negativer Form beeinflusst werden.

12 Einsatz von Enzymen im Alltag

Enzyme finden aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften in den verschiedensten Bereichen sehr große Anwendung. Es gibt zahlreiche Produkte, die Enzyme enthalten oder mithilfe dieser hergestellt worden sind. Der Einsatz von Enzymen boomt – von der Lebensmittelindustrie, über Wasch- und Reinigungsmittel, bis hin zur Medizin, der Textilindustrie, der Papierherstellung, Prozessen der organischen Chemie, sowie einfachen Haushaltsprodukten – Enzyme sind heutzutage fast überall zu finden. Aufgrund dieser riesigen Palette an Anwendungsgebieten von Enzymen kann hier nicht auf jedes dieser Gebiete eingegangen werden. Im Speziellen werden hier Themen behandelt, die vor allem für die Schule, insbesondere für die BHS, relevant sind [7, S.76ff.].

Passende Experimente (Nachweis von Lipase in Verdauungspräparaten am Beispiel des Pankreon, Nachweis von Enzymen in Waschmitteln, Herstellung von Kunsthonig, Nachweis der Chlorophyllase in grünen Bohnen, Nachweis der Myrosinase in Senf, Nachweis der Alliinase in der Zwiebel, Wirkungsweise von Glucoseteststäbchen…) sind in den Kapiteln 22.1-22.3 zu finden.

12.1 Vorteile des Einsatzes von Enzymen

Wie bereits ausführlich darauf eingegangen, besitzen Enzyme außerordentlich positive Eigenschaften. Diese Biokatalysatoren arbeiten bereits bei recht niedrigen Temperaturen und einem pH-Wert nahe dem neutralen Bereich mit äußerst hoher Effizienz. Außerdem ist erwähnenswert, dass bei enzymatisch katalysierten Reaktionen aufgrund der ausgeprägten Spezifität von Enzymen kaum Nebenprodukte auftreten, was zu einer Ausbeute nahe hundert Prozent führt. Des Weiteren ist die Geschwindigkeit von enzymatischen Reaktionen äußerst hoch, was ein weiterer Grund für deren häufigen Einsatz ist. All diese Eigenschaften von Biokatalysatoren machen deren Einsatz wirtschaftlich bedeutsam, da aufgrund dieser sowohl eine Ausbeuteerhöhung, als auch eine Senkung der Produktionskosten infolge einer Energieersparnis herbeigeführt werden können. Außerdem arbeiten Enzyme im Verhältnis zu vergleichbaren chemischen Substanzen sehr umweltschonend, was einen weiteren positiven Effekt der Arbeit mit Enzymen darstellt [30, S.226f.][31].

12.2 Gewinnung von Enzymen

Die ursprüngliche Art und Weise des Einsatzes von Enzymen geht darauf zurück, diese aus tierischem oder pflanzlichem Gewebe zu isolieren, bzw. direkt mit Organismen zu arbeiten, die das benötigte Enzym in sich tragen [30, S.226ff.]. So wird z.B. das pflanzliche Enzym Papain aus der Papayafrucht und das tierische Enzym Chymosin aus der Schleimhaut des Labmagens säugender Kälber isoliert [14, S.44f.]. Diese Methode ist jedoch relativ zeit- und energieaufwändig und liefert zusätzlich eine geringe Ausbeute. Deshalb wird heutzutage bereits sehr häufig die Fermentation von Mikroorganismen zur Gewinnung von Biokatalysatoren als Alternative eingesetzt.

Dazu werden Mikroorganismen, die das gewünschte Enzym produzieren, in einem Bioreaktor gezüchtet. Der benötigte Biokatalysator wird von den Mikroorganismen in das Nährmedium abgegeben und kann von dort aus nach Zerstörung der Zellen isoliert werden [30, S.227ff.]. Immer häufiger werden diese Mikroorganismen gentechnisch so verändert, dass das Enzym, welches von ihnen synthetisiert wird, noch wünschenswertere Eigenschaften aufweist. Diese aus gentechnisch modifizierten Mikroorganismen produzierten Enzyme zeigen im Hinblick auf Aktivität und Struktur keine Abweichungen zu herkömmlichen Enzymen. Allerdings besitzen sie meist einen höheren Reinheitsgrad, sowie eine höhere Spezifität in Bezug auf pH-Wert, Temperatur und Proteolyse. Weiters wird bei Enzymen aus gentechnisch veränderten Mikroorganismen meist die Substratspezifität erhöht, und es werden gewünschte Eigenschaften der Enzymhemmung spezifiziert bzw. unerwünschte Hemmungen deaktiviert. Um solch wünschenswerte Enzyme zu kreieren werden artfremde Gene in leicht kultivierbare Mikroorganismen eingesetzt, diese dann auf einem speziellen Nährboden gezüchtet und schließlich das gewünschte Enzym isoliert [32, S.76ff.].

Im Jahr 2009 wurden in Europa rund 1800 Enzyme im Handel vertrieben, während mehr als 90 davon aus gentechnisch veränderten Mikroorganismen isoliert worden sind. Enzyme der Lebensmittelindustrie stammen zu 50 % aus dieser Art von Mikroorganismen [33, S.10].

Diese Methode der Gewinnung von Enzymen unterliegt strengen Richtlinien. Bevor die aus gentechnisch modifizierten Mikroorganismen gewonnenen Enzyme in den Handel kommen, werden sie einer ausführlichen Sicherheitskontrolle unterzogen. Dabei wird ein großes Augenmerk auf Toxizität und Allergenität gelegt. Auch das fertige Produkt selbst, sowie Produkte, die Enzyme aus GVO (Gentechnisch veränderte Organismen) beinhalten, müssen laut EU-Verordnung 1829/2003 klar deklariert werden.

Die EU-Lebensmittel-Etikettierungsrichtlinie 2000/13/EG besagt, dass auch Lebensmittelzusatzstoffe und Aromastoffe, die Substanzen aus GVOs enthalten, gekennzeichnet werden müssen, während bei technischen Hilfsstoffen die Deklarierung nicht notwendig ist. Diesen Richtlinien zufolge müssen also Produkte, die aus gentechnisch modifizierten Mikroorganismen produzierte Enzyme enthalten, gekennzeichnet werden. Produkte, die mit Hilfe solcher Enzyme synthetisiert worden sind, diese aber in ihrem Endstadium nicht enthalten, müssen nicht zwingend gekennzeichnet werden [32, S.76ff.].

Nicht nur Lebensmittel werden mithilfe von Enzymen hergestellt. Die sogenannte weiße Biotechnologie verwendet Biokatalysatoren unter anderem auch zur Synthese von Treibstoff, wie z.B. Biodiesel. Auch zur Produktion von Bioethanol und Biogas wird dieser umweltfreundliche und energiesparende Weg immer häufiger eingeschlagen.

Einen besonderen Aufschwung erlebt die biotechnologische Herstellung von Kunststoffen, welche auf der enzymatischen Umsetzung von Polymilchsäure basiert [13, S.168].

Zukünftig wird darauf geachtet werden, unter Zuhilfenahme der Biotechnologie Enzyme dahingehend zu verändern, dass sich sowohl sensorische, als auch ernährungsphysiologische Verbesserungen von verschiedenen Lebensmitteln erkennen lassen. Außerdem möchte man Produktionszeit und –kosten senken, während aber die Qualität der Produkte erhalten, bzw. gesteigert werden soll. Zusätzlich möchte man mittels Gentechnik Risikofaktoren wie Allergene reduzieren, während man den Einsatz von Enzymen zur Produktion gesundheitsfördernder Substanzen, wie Antioxidantien, aktivieren möchte [32, S.76ff.].

12.3 Einsatz von Enzymen in der Medizin

Enzyme, als die Kernstücke aller Stoffwechselwege, sind auch aus medizinischer Sicht von großer Bedeutung. Dabei sind Enzyme neben ihrer Eigenschaft als Krankheitsverursacher nicht nur mit Negativem behaftet, sondern dienen auch der Diagnose von Krankheiten oder werden in speziellen Messgeräten eingesetzt. Auch die Pharmaindustrie bringt immer mehr Medikamente auf den Markt, die auf verschiedenen Arten mit Enzymen interagieren.

Enzyme können Indizien für Krankheiten sein, wenn deren Konzentration an unerwünschten Orten des Organismus plötzlich zu hoch steigt, oder zu nieder absinkt. So werden Enzyme z.B. von geschädigten Zellen in das umgebende Blutplasma abgegeben und können dort identifiziert werden.

Beispiele für solche Enzyme, die der Diagnose von Krankheiten dienen, sind die Kreatinkinase, welche in hoher Konzentration auf einen Herzinfarkt schließen lässt, und die Lipase, welche ein pathologisches Verhalten der Bauchspeicheldrüse vermuten lässt [5, S.77f.]. Außerdem dienen Enzyme auch als Hilfsstoffe in Teststreifen und Messgeräten der Diagnose von Krankheiten. So wird z.B. der Glucose-Oxidase-Test (GOD-Test) zur Messung des Blutzuckerspiegels und somit zum Nachweis der Krankheit Diabetes mellitus eingesetzt. Dieser Test basiert auf einer Redoxreaktion. Die im zu testenden Blut vorhandene Glucose wird mittels Glucose-Oxidase oxidiert, wobei das im Teststreifen zusätzlich vorhandene Wasserstoffperoxid mittels Peroxidase zu Wasser reduziert wird. Diese Reduktion des H_2O_2 zieht eine charakteristische Farbreaktion mit sich, wodurch auf die Konzentration der Glucose im Blut geschlossen werden kann [34, S.183].

Da fast alle Stoffwechselvorgänge auf das Wirken von Enzymen angewiesen sind, kann sich eine zu hohe, bzw. eine zu niedrige Aktivität dieser negativ auf den Organismus auswirken und verschiedene Krankheiten mit sich bringen.

Immer mehr Medikamente zielen auf die Wirkung von Enzymen ab. Sie heben entweder deren Konzentration an gewissen Orten des Organismus, oder senken bzw. inhibieren diese. Mittlerweile werden Enzyminhibitoren als die zweitgrößte Arzneistoffklasse angesehen [2, S.427]. So hemmt z.B. das Gichtmedikament Allopurinol das Enzym Xanthinoxydase. Dieses ist für die Bildung von Harnsäure verantwortlich, welche wiederum bei Ablagerung in den Gelenken zu enormen Schmerzen führen kann [5, S.77f.].

Als ein weiteres Beispiel für ein Medikament, das auf die Hemmung eines Enzyms spezialisiert ist, ist das Penicillin zu nennen. Die Struktur dieses medizinischen Wirkstoffes lässt sich von der 6-Aminopenicillansäure ableiten. Penicillin besitzt wie viele weitere antibakterielle Substanzen auch einen viergliedrigen β-Lactamring, welcher für dessen Wirkung verantwortlich ist. Interessant an der Wirkungsweise des Penicillins ist, dass ruhende Bakterien meist nicht angegriffen werden, während sich Organismen, die sich in der Vermehrung befinden, stark beeinflusst werden. Außerdem kann dieses Medikament ausschließlich zur Bekämpfung grampositiver Bakterien eingesetzt werden, während gramnegative nicht darauf ansprechen. Die Zellwand grampositiver Bakterien besteht aus einer Mureinschicht (Peptidoglycane), welche wiederum aus N-Acetylmuraminsäurepeptiden zusammengesetzt ist. Das Penicillin greift nun diese Bakterien an, indem es negativen Einfluss auf die Synthese der Bakterienzellwand ausübt.

Der letzte Schritt dieser Synthese besteht darin, dass das Enzym Transpeptidase zwei Peptidoglucanbausteine miteinander verknüpft.

Penicillin interferiert mit dem Bakterium so, dass dessen β-Lactamring aufgespalten wird, und sich der daraus resultierende Rest kovalent an die Transpeptidase bindet. Dieses Enzym wird dadurch irreversibel gehemmt, weswegen die Zellwand grampositiver Bakterien nicht vollständig aufgebaut werden kann. Folglich können diese Bakterien aufgrund starker osmotischer Belastungen nicht bestehen [27, S.479].

Auch zur Behandlung von HIV, der Vorstufe von AIDS, werden enzymhemmende Substanzen eingesetzt. Der HIV-Virus schleust sich in die Wirtszelle ein und vermehrt sich dort. Infolge dieser Infektion wird das Immunsystem des Wirtsorganismus stark angegriffen und in weiterer Folge zerstört. Um sich im Wirt vermehren zu können, muss die virale RNA zuerst mittels reverser Transkriptase in die für die Wirtszelle leserliche DNA umschrieben werden und anschließend mittels Integrase in diesen Organismus eingebracht werden. Diese DNA trägt den genetischen Code zur Vervielfältigung der viralen RNA und zur daraus folgenden Produktion von Proteinen. Diese Proteine müssen schließlich von der HIV-Protease in strukturell passende Komponenten geschnitten werden, um in Viruspartikel verpackt werden zu können, denen es möglich ist, weitere Wirtszellen zu befallen. Moderne HIV-Medikamente zielen nun darauf ab, diese, die virale Erbinformation vermehrenden, Enzyme zu hemmen und somit deren Proliferation einzustellen. Als Beispiel sei der Arzneistoff 3`-Azido-3`-desoxythymidin zu nennen, welcher die reverse Transkriptase inhibiert, und somit einen Kettenabbruch der durch die Transkription entstehenden DNA bewirkt. Diese enthält somit nicht mehr die entsprechende Erbinformation, um die virale RNA zu vermehren, bzw. um virale Proteine herzustellen [2, S.416f.][35, S.27f.].

12.4 Einsatz von Enzymen in der Lebensmitteltechnologie

Eines der größten Einsatzgebiete von Enzymen ist die Lebensmitteltechnologie. Bereits vor vielen hundert Jahren wurden mithilfe von Enzymen Wein, Bier und Essig hergestellt. Heute weiß man genauer über deren Wirkungsweise Bescheid und verwendet meist nicht mehr Mikroorganismen selbst, sondern die von ihnen produzierten Enzyme in gereinigter Form als Enzympräparate zur Synthese verschiedener Lebensmittel. Außerdem werden auch in der Lebensmitteltechnologie immer häufiger Enzyme gentechnisch veränderter Mikroorganismen eingesetzt [5, S.77f.].

In der Lebensmitteltechnologie werden Enzyme unter anderem zur Produktion von Lebensmitteln, zur Verbesserung von Geschmack und Haltbarkeit, zur Minimierung von Allergenen oder zur Optimierung des äußeren Erscheinungsbildes eingesetzt.

Als Beispiel für die Verwendung eines Enzyms zur Einschränkung bestimmte allergischer bzw. krankmachender Reaktionen, sei das Lysozym genannt. Dieses aus Eiklar gewonnene Enzym baut die Mureinsäure grampositiver Bakterien ab und wirkt somit antibakteriell. Lysozym wird dem Käse zugesetzt, um die durch Chlostridien entstehende Spätblähungen zu minimieren [14, S.43].

Um die Ausbeute bei der Herstellung von Fruchtsäften oder Marmeladen zu erhöhen, werden Pektinasen eingesetzt. Diese Enzyme brechen die Pektin-Substanz der Zellwand von Früchten auf und sorgen damit für die Auflockerung der Zellstruktur. Somit kann mehr Saft aus den Früchten gepresst werden [36, S.20]. Pektinasen werden zusammen mit Pektinmethylesterasen und Cellulasen als Maischeenzyme eingesetzt [14, S.43].

Ein weiteres Enzym, das sehr häufig in der Lebensmittelproduktion eingesetzt wird, ist das Labenzym Chymosin oder auch Rennin genannt. Es wird im Labmagen von Kälbern synthetisiert, von wo aus es isoliert werden kann. Dieses Enzym wird bei der Produktion von Käse zur Gerinnung der Milch verwendet. Durch die Zugabe des Chymosins wird das Casein-Eiweiß der Milch gespalten und dadurch deren Dicklegung herbeigeführt. Zusammen mit den vorhandenen Calcium-Ionen kommt es schließlich zu einer Koagulation [37, S.94f.] Jährlich sind für die Herstellung von 14 Millionen Tonnen Käse 50.000 kg Chymosin notwendig, was einen Bestand von 70 Millionen Kälbermägen voraussetzt. Da diese Anzahl an Kälbern nicht mehr zur Verfügung steht und bereits eine große Nachfrage an vegetarisch produziertem Käse vorliegt, wird Chymosin mittlerweile vorzugsweise gentechnisch hergestellt. Dazu werden vor allem die Mikroorganismen Escherichia coli, Kluyveromyces lactis und Aspergillus niger herangezogen [38, S.535].

Einen durchaus großen Anwendungsbereich finden Enzyme in der Backwarenindustrie. Bei der Herstellung von Brot, Gebäck und Mehlspeisen ist die endogene Enzymaktivität der für den Teig verwendeten Zutaten besonders wichtig für optimalen Geschmack und Aussehen. Jedoch nicht alle eingesetzten Mehle bringen perfekte enzymatische Rahmenbedingungen mit sich. So besitzt z.B. Roggenmehl eine zu hohe Konzentration an Amylase, Weizenmehl jedoch eine allgemein zu niedrige Enzymaktivität.

Diese Gegebenheiten können entweder technisch, z.B. durch Senkung des pH-Wertes während der Produktion oder mittels externer Enzyme geregelt werden. Es wird vor allem mit aus Mikroorganismen synthetisierten Enzymen gearbeitet, die der Backware in Form von Enzympräparaten zugesetzt werden. Diese Enzyme haben die Aufgabe, rheologische Eigenschaften des Teiges zu verbessern, eine längere Haltbarkeit herbeizubringen, Vorläufer von Aroma und Farbe zu bilden und genügend Nährstoffe für die Hefe zur liefern. So werden unter anderem bei der Herstellung von Weizenbrot die in der nachstehenden Tabelle angeführten Enzyme eingesetzt [39, S.17ff.].

Tabelle 2: Darstellung von Enzymen der Backindustrie.

Enzym	Ursprung	Eigenschaft
α-Amylase	Aspergillus- und Bacillus-Stämme	Spaltung von Stärkegranula, Verhinderung des Altbackenwerdens [39, S.36f.]
Xylanase	Aspergillus- und Bacillus-Stämme	Erhöhung der Knettoleranz, der Gärstabilität und des Wasserbindevermögens [39, S.29ff.]
Lipoxygenase	Leguminosenmehle	Aufhellung des Teiges und Erhöhung der Teigfestigkeit [39, S.31ff.]
Glucoseoxidase	Aspergillus niger	Oxidation von Glucose zu H_2O_2, welches den Teig verfestigt [39, S.33]
Amyloglucosidase	Aspergillus niger	Produktion von Glucose zur Fermentation durch die Hefe [39, S.33]

12.5 Einsatz von Enzymen in Wasch-und Reinigungsmitteln

Der Gebrauch von Enzymen in Waschmitteln boomt. Bereits im Jahr 2010 wurden 90 % aller Waschmitteln Enzyme zugesetzt [40, S.114]. Bei starken Verunreinigungen wie gehärtetem Blut, Kakaoflecken oder Bratensoßenrückständen, reicht eine Mischung von Tensiden und Bleichmitteln häufig nicht mehr aus, um die Wäsche optimal zu reinigen.

So wurde in den 50er Jahren stark verschmutzte Wäsche noch eingeweicht und anschließend als sogenannte Kochwäsche bei 100°C gewaschen. Enzyme allerdings erleichtern den Waschvorgang stark verschmutzter Wäsche immens, indem sie wasserunlösliche große Moleküle, wie Triglyceride, Phosphatide, Amylopektin, Polypeptide oder Cellulose, in kleine Teile zerlegen. Diese kleinen Bausteine, zu denen unter anderem Glycerin, Aminosäuren und Glucose zählen, sind gut wasserlöslich und können somit leicht von Tensiden und Bleichmitteln bearbeitet werden. Außerdem ist das Waschen mit Enzymen aufgrund deren Eigenschaften enorm zeit- und energiesparend sowie umweltschonend [41].

Erstmalig wurde im Jahr 1913 über die Waschwirkung von Enzymen nachgedacht. Allerdings war zu dieser Zeit nur die äußerst sensible Pankreas-Protease bekannt. Diese arbeitet jedoch bei den beim Waschen vorherrschenden Bedingungen nicht effizient genug. Seit 1960 ist es möglich, Proteasen aus Bakterien, hauptsächlich aus dem Bakterium Bacillus subtilis, zu isolieren. Diese Enzyme arbeiten auch bei höheren Temperaturen sowie alkalischem pH-Wert und können somit zur Reinigung der Wäsche eingesetzt werden. Seit 1989 werden Enzyme für die Verwendung in Waschmitteln auch gentechnisch hergestellt. Somit werden deren Waschleistung und deren Temperatur- und pH-Toleranz gesteigert.

Neben Proteasen, welche die Hauptklasse der Waschmittelenzyme darstellen, werden auch Lipasen, Amylasen, Cellulasen und Mannanasen eingesetzt. Proteasen dienen der Spaltung von Proteinen, Amylasen fördern die Entfernung stärkehaltiger Flecken, Lipasen spalten Fette und Cellulasen glätten Baumwollfasern durch Spaltung von Cellulose. Die Mannanase findet erst seit kurzer Zeit Anwendung. Sie dient der Spaltung von Galactomannan, welches in Verdickern, wie Guarkernmehl oder Johannisbrotkernmehl vorkommt [40, S.111].

13 Kompetenzmodelle für den naturwissenschaftlichen Unterricht

In letzter Zeit wurde aufgrund unzähliger Bildungsdebatten und allgmeiner Testungen, wie PISA, vermehrt darüber nachgedacht, welche Fähigkeiten und Fertigkeiten Schüler/innen innerhalb einer Schulstufe erreichen sollten [42, S.188]. Diese Gedanken haben Kompetenzen und Bildungsstandards ins Leben gerufen. Um sich jedoch mit kompetenzorientiertem Unterricht beschäftigen zu können, müssen vorab einige Begriffe genauer betrachtet werden. Kompetenzorientierter Unterricht stützt sich auf Kompetenzen, die in sogenannten Kompetenzmodellen zusammengefasst sind und mithilfe derer Bildungsstandards für den Unterricht festgelegt werden.

13.1 Definition von Kompetenzen

Eine heute durchaus gängige Definition von Kompetenzen ist die von Lehr- und Lernforscher Weinert 2001 formulierte. Laut dieser handelt es sich bei Kompetenzen um *„die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“* [43, S.27].

Anhand der Definition Weinerts wird klar, dass eine Kompetenz eine bestimmte Fähigkeit oder Fertigkeit beschreibt, die nicht nur durch reines Wissen von erlernten Inhalten erlangt werden kann, sondern erst durch die Verknüpfung dieser Kenntnisse mit speziellen Handlungen ihren Höhepunkt erreicht. Reines Verstehen komplexer Inhalte genügt somit nicht, um eine Kompetenz aufzubauen. Mittels der Betrachtung von Kompetenzen kann man folglich nicht nur auf das wissensbezogene Können von Schüler/innen schließen, sondern auch auf deren Fähigkeit, mit diesen Kenntnissen umzugehen. Außerdem kann ein Rückschluss auf deren Willigkeit, sich genauestens auf diese Inhalte einzulassen und sich mit den Inhalten in Korrelation zu bringen, gezogen werden [44, S.9f.].

Aufgrund dieser Verknüpfung von Regelwissen mit alltags-, bzw. handlungsbezogenen Aspekten sind Lernende dazu befähigt, ihr Können auch außerhalb der Schule zum Lösen spezieller abstrakter Problemstellungen verantwortungsvoll einzusetzen [45, S.45ff.].

Der allgemeine Begriff einer Kompetenz kann auf alle Menschen jeden Alters und jeden Geschlechts übertragen werden und ist somit nicht nur beschränkt auf Schüler/innen.

Kompetenzen sind immer inhaltsbezogen und finden nur auf einem bestimmten Themengebiet Anwendung [42, S.14]. Entscheidend für das Lösen spezieller Fragestellungen und Anforderungen ist allerdings der gesamte Komplex an erworbenen Kompetenzen zu verschiedenen Sachverhalten. Folglich reicht häufig eine Kompetenz alleine nicht aus, um einer spezifischen Fragestellung nachzugehen [46, S.31]. Hat man jedoch erst einmal mittels zielgerechter Bildung eine Kompetenz erlangt, so kann einem diese nicht mehr genommen werden [42, S.14].

Ziel der Bildung soll es sein, den Lernenden in vielen verschiedenen Gebieten eine Grundkompetenz zu vermitteln. Eine solche Grundkompetenz ist mit Allgemeinwissen gleichzusetzen und bildet die Basis für den Erwerb weiterer, spezifischer Kompetenzen. Ein solches Basiswissen bildet außerdem den Grundstein für ein Überführen des Erlernten hin zu alltäglichen Themenkomplexen und speziellen Sachverhalten. Zum Erlangen solcher Grundkompetenzen sind sogenannte Schlüsselkompetenzen notwendig. Diese lassen sich als grundlegende Fähigkeiten und Fertigkeiten beschreiben, die als Grundvoraussetzung für einen weiteren Wissenserwerb dienen. Dazu zählt unter anderem die Fähigkeit zur Kommunikation in der eigenen Muttersprache [44, S.10].

Macht man sich Gedanken über den Erwerb von Kompetenzen so sollte man beachten, dass Kompetenzen nicht kurzfristig, z.B. nach intensivem Lernen für eine Überprüfung, erworben werden können. Dafür bedarf es einen längeren Zeitraum. Außerdem muss man sich darüber im Klaren sein, dass dieses Zeitfenster nicht für alle Menschen gleich groß ist, sondern dass es beim Erwerb von Fähigkeiten und Kenntnissen recht große zeitliche Differenzen gibt. Individuen bringen unterschiedliche Voraussetzungen mit sich, die unter anderem auf genetische Ebenen zurückzuführen sind. Aufgrund dieser individuellen Ausgangspunkte ist es je nach Person verschieden, wie schnell und wie tiefgreifend eine bestimme Kompetenz ausgeprägt werden kann. Damit es zur Ausbildung einer Kompetenz kommen kann, müssen die Lernenden sowohl Lernpotential, als auch Lernbereitschaft zeigen [42, S.14ff.]. Die Lernbereitschaft wird unter anderem intensiv durch die vorhandene Motivation bestimmt, welche maßgebend ist für erfolgreiches Handeln [44, S.9f.]. Als Lehrperson kann man das Erwerben von Kompetenzen fördern, in dem man eine für Schüler/innen eine anreizende Atmosphäre schafft und ihnen viele verschiedene Unterrichtsmethoden, wie Beobachtungen, Portfolios, Befragungen etc. bietet [46, S.32f.]. Des Weiteren ist es wichtig, dass die kognitive Aktivität der Lernenden mittels aufgeworfener Diskussionen oder Hinterfragungen von Widersprüchen gefördert wird [42, S.18].

13.2 Kompetenzen im naturwissenschaftlichen Unterricht

Neben dem Wissen in den Bereichen Mathematik und Deutsch wurden bei der PISA-Studie 2006 auch erstmals die Kompetenzen der Lernenden im Komplex Naturwissenschaften in das Blickfeld aufgenommen. Bei dieser Testung lagen sowohl Österreich, als auch Deutschland, knapp über dem OECD-Durchschnitt [47, S.14, S.68]. Infolge des Ergebnisses dieser Studie wurde der naturwissenschaftliche Unterricht in österreichischen Schulen intensiv betrachtet. Dabei wurde vor allem klar, dass es sich bei der am häufigsten vollzogenen Unterrichtsform in Österreich um den fragend-entwickelnden Unterricht handelt. Hierbei wird genau auf verschiedene Sachverhalte eingegangen, indem Schüler/innen in den Unterricht miteinbezogen werden, diese jedoch keine zentrale Rolle spielen. Im Gegensatz dazu kommen interaktive Unterrichtsformen sowie Experimentiereinheiten meist viel zu kurz. Diese die Lernenden in ihrer Kreativität und ihrer kognitiven Aktivität fordernden Unterrichtsmethoden würden sich aber enorm positiv auf den erfolgreichen Erwerb von Kompetenzen auswirken [42, S.188f.].

Ein weiterer Punkt, der negatives Licht auf den naturwissenschaftlichen Unterricht wirft, ist dessen Beurteilung. Die Benotung von Lernenden erfolgt überwiegend auf Basis reiner Reproduktion von erlerntem Wissen. Außerdem sind die meisten Beurteilungen nur von sehr kurzer Relevanz, da Schüler/innen meist lediglich für eine Überprüfung lernen und somit deren Wissen keine große Nachhaltigkeit besitzt. Besonders wichtig für nachhaltiges Lernen und für die Förderung von Kompetenzen wäre eine Kriterien bezogene Beurteilung [42, S.188].

Ein kompetenzorientierter Unterricht und die sich daraus ergebenden Bildungsstandards sollen nun diese negativen Punkte des naturwissenschaftlichen Unterrichts dezimieren. Im kompetenzorientierten, naturwissenschaftlichen Unterricht wird vor allem Augenmerk darauf gelegt, einen Unterricht zu bieten, in dem Schüler/innen eine aktive und zentrale Rolle zugeschrieben wird. In einem solchen ganzheitlichen Unterricht wird nicht nur auf die kognitive Leistung der Lernenden geachtet, sondern es werden viele weitere naturwissenschaftliche Handlungen, wie selbstständiges Experimentieren oder Beobachten, miteinbezogen. Diese sozial-motivationale Komponente spielt allgemein im kompetenzorientierten Unterricht eine durchaus große Rolle [42, S.189ff.]. Es wird somit außerdem die Nachhaltigkeit des Unterrichts, sowie die Flexibilität des Abrufens von Wissen gefördert und somit eine Basis für lebenslanges Lernen geschaffen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, um Kompetenzen von Schüler/innen zu fördern, ist das Bereiten eines passenden Lernangebotes. Der optimale Schwierigkeitsgrad von Aufgaben befindet sich direkt an der Schnittstelle zwischen dem Können und dem Nicht-Können der Schüler/innen. Zu leichte Aufgaben führen unter Umständen zu Unterforderung, während zu komplexe Beispiele die Motivation der Lernenden aufgrund von Überforderung einschränkt. Folglich ist es besonders wichtig, dass die Lehrperson über die Kompetenzen der Schüler/innen genauestens Bescheid weiß [44, S.9f.].

13.3 Kompetenzmodelle

Als Kompetenzmodelle werden Modelle angesehen, in denen Kompetenzen übersichtlich und strukturell zusammengefasst sind. Sie verweisen auf Kenntnisse und Fähigkeiten, die Lehrpersonen den Schüler/innen einer bestimmten Schulstufe näher bringen sollen. Daraus lassen sich folglich die von den Lernenden einer Altersstufe zu erwarteten Fähigkeiten und Fertigkeiten herauslesen. Kompetenzmodelle sind fachspezifisch aufgebaut und berücksichtigen nicht nur kognitive Leistungen der Lernenden, sondern beziehen auch sozial-motivationale Komponenten mit ein [42, S.191ff.].

Kompetenzmodelle sind in verschiedene Ebenen gegliedert, die je nach Alter und Schulstufe für die Lernenden relevant sind. Jede dieser Kompetenzstufen definiert einen bestimmten Wissensumfang und eine Handlungsfähigkeit, die Schüler/innen dieser Ebene bewerkstelligen sollen [44, S.10ff.].

Im Allgemeinen differenziert man zwischen normativen und destruktiven Kompetenzstruktur- bzw. Kompetenzentwicklungsmodellen [48, S.12]. Normative Kompetenzmodelle geben die zu erreichenden Ziele innerhalb einer Schulstufe an. Solche Modelle werden in Österreich zur Erstellung von Bildungsstandards herangezogen. Im Gegensatz dazu beschreiben destruktive Modelle das derzeitige Verhalten von Lernenden und somit deren bereits erworbene Kompetenzen [49, S.46ff.].

„Ein normatives Kompetenzstrukturmodell ist das Gefüge einer nach Dimensionen (z.B. Kompetenzbereiche, Kompetenzausprägungen) gegliederten Beschreibung der (kognitiven) Voraussetzungen, über die ein Lernender verfügen soll, um Aufgaben und Probleme in einem bestimmten Gegenstands- oder Anforderungsbereich lösen zu können“ [50, S.74].

„Ein destruktives Kompetenzstrukturmodell ist das Gefüge einer nach Dimensionen gegliederten Beschreibung eines „typischen“ Musters (kognitiver) Voraussetzungen, mit dem man das Verhalten von Lernenden beim Lösen von Aufgaben und Problemen in einem bestimmten Gegenstands- oder Anforderungsbereich rekonstruieren bzw. beschreiben kann“ [49, S. 47].

Kompetenzentwicklungsmodelle geben Auskunft über die zeitliche Bildung von Kompetenzen. Es werden Prognosen aufgestellt, welche Kompetenzen von Lernenden eines gewissen Alters oder einer bestimmten Schulstufe nach einer definierten Zeit erreicht werden sollten. Um jedoch die tatsächliche kompetenzbasierte Entwicklung von Lernenden erfassen zu können, müssen sowohl fachliche Aspekte, als auch das Vorwissen der Schüler/innen, sowie deren sich auch auf das Lernen auswirkende Umfeld, in die Beobachtung mit einbezogen werden. Im Gegensatz dazu bilden Kompetenzstrukturmodelle, wie sie in Österreich für das Erstellen von Bildungsstandards üblich sind, ein strukturelles Gerüst aus Kategorien, anhand derer die zu erreichenden Kompetenzen geordnet dargestellt werden. Hier können sowohl normative, wie für Bildungsstandards in Österreich zutreffend, als auch deskriptive Kompetenzen vermerkt werden [49, S.48].

13.3.1 Das österreichische Kompetenzmodell „Naturwissenschaften 8. Schulstufe“

Das in Österreich gängigste Kompetenzmodell „Naturwissenschaften 8. Schulstufe“ ist für die drei naturwissenschaftlichen Gegenstände Chemie, Biologie und Physik entworfen worden. Das BIFIE (Institution des Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur zur Vermittlung zwischen Schulverwaltung, Forschung und schulischer Praxis) wurde 2007 mit der Erstellung dieses Modelles beauftragt und die derzeitige Endversion wurde im Oktober 2011 verfasst [51][52]. Dieses normative Kompetenzstrukturmodell ist in drei Dimensionen gegliedert. Die Handlungsdimension stellt die zentrale Komponente dar und spiegelt die Aktivität der Lernenden wieder. Die Inhaltsdimension gibt die in dieser Schulstufe relevanten Inhalte wieder und die Anforderungsdimension stellt die unterschiedlichen Qualitäten der zu erwerbenden Kompetenzen dar. Sowohl die Handlungs-, als auch die Anforderungsdimension sind für alle drei naturwissenschaftlichen Gegenstände einheitlich, während sich deren Inhaltsdimensionen unterscheiden [42, S.192f.].

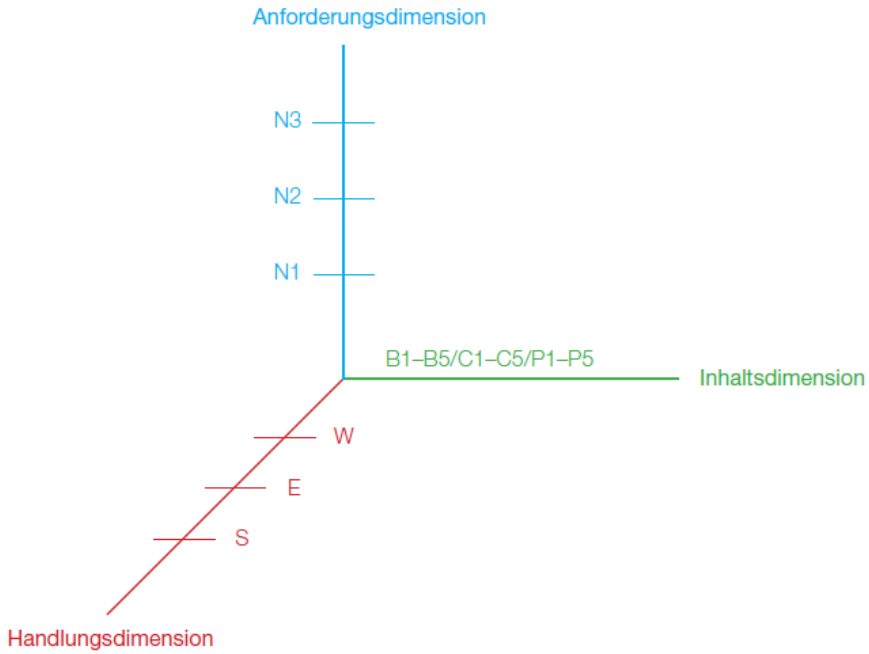


Abbildung 18: österreichisches Kompetenzmodell Naturwissenschaften [93, S.1].

13.4 Bildungsstandards

„Bildungsstandards formulieren Anforderungen an das Lehren und Lernen in der Schule. Sie benennen Ziele für die pädagogische Arbeit, ausgedrückt als erwünschte Lernergebnisse der Schülerinnen und Schüler“ [50, S. 19].

Wie von Klieme definiert, legen Bildungsstandards fest, welche Kenntnisse und Fähigkeiten sich Lernende nach der 4. bzw. nach der 8. Schulstufe angeeignet haben sollten. Solche Bildungsstandards wurden als Reaktion auf weniger zufriedenstellende Ergebnisse internationaler Testungen bereits 2001 für die Fächer Deutsch, Mathematik und Englisch formuliert [48, S.9f.]. Die Bildungsstandards für naturwissenschaftliche Fächer befinden sich in Österreich seit 2005 im Entwicklungszustand. Allgemein basieren Bildungsstandards auf Kompetenzmodellen [42, S.189]. Generell unterscheidet man zwischen Regelstandards und Mindeststandards. Regelstandards beschreiben die Menge an Qualifikationen, die der Durchschnitt der Lernenden erreicht haben sollte. Schüler/innen mit einem Ergebnis unter diesem Durchschnitt weisen ein Defizit auf. Mindeststandards hingegen geben das Mindestmaß an Kompetenzen an, die alle Lernenden besitzen müssen, um qualifiziert in eine höhere Schulstufe oder in die Berufswelt einsteigen zu können [48, S.9f.].

Da Kompetenzen jedoch nicht eindeutig zu messen sind, geben Bildungsstandards in Form von „Kann-Beschreibungen“ an, welche Haltungen, Fähigkeiten und Fertigkeiten Schüler/innen bis zur 4., bzw. 8. Schulstufe übermittelt werden sollen, um diese optimal auf deren weitere schulische oder berufliche Laufbahn vorzubereiten [53].

Ziel von Bildungsstandards ist es, mittels regelmäßiger Überprüfungen eine relativ simple Vergleichbarkeit des Unterrichts durch allgemein definierte Standards zu ermöglichen. Somit bekommen Lehrpersonen ein professionelles Feedback über ihren Unterricht und auch Schüler/innen können ihr derzeitiges Kompetenzniveau gut abschätzen. Weiters soll durch sowohl die Motivation des Lehrpersonals, als auch die der Lernenden gesteigert werden, womit folglich auch die Qualität des Unterrichts weiterentwickelt wird [48, S.9f.]. Ein weiterer positiver Punkt des Arbeitens mit Bildungsstandards ist die daraus folgende nachhaltige Ergebnisorientierung des Unterrichts. Es wird nicht mehr das Überprüfen von speziellem Wissen in den Vordergrund gestellt, sondern auf das Verstehen von komplexen naturwissenschaftlichen Zusammenhängen Wert gelegt. Somit wird das Ausbilden von nachhaltigem, längerfristigem Wissen gefördert. Aufgrund dessen zeigen sich Bildungsstandards im Gegensatz zu herkömmlichen Lehrplänen vor allem auch aufgrund vorgefertigter prototypischer Beispielaufgaben zu den verschiedensten Themengebieten, viel handlungsorientierter [42, S.189f.].

14 Merkmale kompetenzorientierten Unterrichts

Nach eingangs formulierten Definitionen grundlegender Begriffe kompetenzorientierten Unterrichts, kann dieser nun zusammenfassend anhand folgender Punkte charakterisiert werden:

- Nachhaltigkeit: Bei kompetenzorientiertem Unterricht handelt es sich um das Einbinden von Kompetenzen und Kompetenzmodellen in den Unterricht. Dabei werden Kompetenzen im Gegensatz zu herkömmlichem Unterricht systematisch und nachhaltig entwickelt [48, S.29ff.].
- Individualisierung: Die Unterrichtsziele müssen von den Lehrpersonen an den jeweiligen Kompetenzstatus der Lernenden angepasst werden, um einen optimalen Lernerfolg zu erzielen. Mit der natürlichen Heterogenität einer Klasse wird umgegangen, indem die Aufgaben individuell an die Schüler/innen angepasst werden.

Lehrpersonen haben die Aufgabe, passendes Material für Lernende bereitzustellen, um so deren Motivation und folglich deren Leistung zu steigern. Dabei ist es wichtig, dass die Komplexität der Aufgaben wächst, um Lernerfolge zu erzielen. [44, S.12ff.].

- Selbstständigkeit: Ziel des kompetenzorientierten Unterrichts ist es unter anderem, dass Schüler/innen sich ihr Wissen Großteils selbstständig aneignen, während die Lehrperson nur als eine Art Coach fungiert. Hier dienen vor allem kooperatives Lernen und Projektunterricht als passende Unterrichtsmethoden [45, S.48].
- Sinnstrukturen: Mittels kompetenzorientierten Unterrichts soll langfristiges Wissen gefördert werden. Dieses soll als eine Art Wissensnetzwerk ineinander greifen, wodurch komplexe Themengebiete logisch miteinander verknüpft werden. Um das Langzeitgedächtnis von Schüler/innen zu aktivieren, müssen verschiedene Themengebiete wiederholt im Unterricht durchgenommen werden. Erst nach mehrmaliger Erfahrung können Kompetenzen entwickelt werden [44, S.9ff.].
- Kompetenzraster: Als Hilfe für Lehrpersonen soll das Kompetenzraster dienen. Auch Schüler/innen können anhand solcher Raster ihre Lernleistung strukturell gliedern und ihre Fortschritte einschätzen. Ein solches Raster gibt sowohl die zu erlernenden Inhalte, als auch die Qualität des Könnens an, was zu einer recht guten Einschätzung des Wissensstandes der Lernenden führen kann [45, S.48]. Dabei ist es wichtig, den Lernenden realistische Teilziele zu setzen, und sie nicht mit den am Ende eines Semesters oder Schuljahres zu erreichenden Kompetenzen zu überfordern [44, S.23].

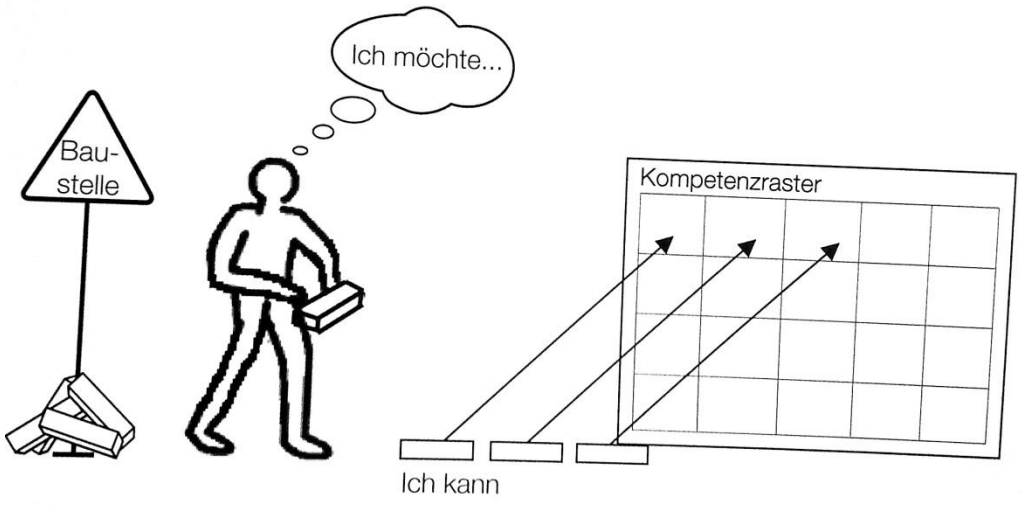


Abbildung 19: Darstellung der Arbeit mit Kompetenzrastern [44, S. 12].

- Lernklima: Ein wichtiger Punkt kompetenzorientierten Unterrichts ist das Schaffen einer positiven Lernumgebung. Sowohl die soziale Verbindung unter den Schüler/innen, als auch der Kontakt mit der Lehrperson sollte gestärkt werden, um ein positives Lernklima herbeizuführen [44, S.9ff., S.20].

15 Entwicklung kompetenzorientierten Unterrichts [45, S.145ff.]

Um herkömmlichen Unterricht zu verändern und kompetenzorientierten Unterricht einzuführen, empfiehlt es sich, fünf didaktische Dimensionen zu beachten. Diese Dimensionen wurden von Kees Vreugdenhil verfasst, jedoch nie veröffentlicht. Lediglich am Allgemeen Paedogogisch Studium in Utrecht wird damit gearbeitet. Die fünf Dimensionen zur Veränderung des Unterrichts dienen als eine Art Modell, welches die Einführung kompetenzorientierten Unterrichts vereinfacht. Die verschiedenen Dimensionen stehen untereinander in Wechselwirkung, folgen aber keiner konkreten Reihenfolge. Allerdings stellen die Leitbild- und Bewertende-Dimension die wichtigsten Stellschrauben dar, während sich die Inhaltliche, Methodische und Organisatorische Dimension dazwischen erstrecken. Die Änderung einer Dimension fordert die Variabilität einer weiteren. Entstehen Schwierigkeiten bei der Einführung kompetenzorientierten Unterrichts, oder verläuft dessen Durchführung nicht wie erwünscht, so lohnt es sich, sich mit diesen nachstehend genauer definierten Dimensionen auseinanderzusetzen. Wurde eine Dimension im Vorfeld nicht genau beachtet, bzw. durchdacht, so kann dies ein Grund für einen nicht sehr zielführenden oder chaotischen Unterricht sein.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der zeitliche Rahmen, der für eine Veränderung von Unterricht gegeben ist. Es muss nicht zwingend sein, all diese Dimensionen zeitgleich zu verändern. Es kann durchaus zielführender sein, sich mit einer dieser Dimensionen ausgiebig zu beschäftigen, diese für eine entsprechende SchülerInnengruppe zu optimieren und in der Klassengemeinschaft zu erproben, während erst anschließend an eine weitere Dimension herangegangen wird.

Leitbilddimension

Diese für die Veränderung des Unterrichts ausschlaggebende Dimension ist die tatsächlich regulierende Ebene. Hier wird über das tatsächliche Vorhaben nachgedacht, sowie die genauen Rahmenbedingungen erläutert. Außerdem wird der genaue Gegenstand der Veränderung anhand verschiedener Theorien charakterisiert.

Inhaltliche Dimension

Diese Dimension beschreibt exakt die Inhalte der Veränderung. Bei der Einführung kompetenzorientierten Unterrichts wird hier vor allem festgelegt, welche Fächer sich dieser Unterrichtsform anschließen, bzw. welche Inhalte in Form kompetenzorientierten Unterrichts dargeboten werden. Somit charakterisiert diese Dimension die tatsächlichen unterrichtlichen Ziele.

Methodische Dimension

Diese Ebene bezieht sich auf die Art und Weise der Umsetzung der Veränderung des Unterrichts. Es geht darum, welche Unterrichtsmethoden eingesetzt werden, auch in Bezug auf besondere Vorlieben von Lernenden und Lehrpersonen.

Organisatorische Dimension

Die organisatorische Dimension beschreibt die Organisation des Unterrichts. In diese Sparte fallen sowohl die räumlichen, als auch die zeitlichen Rahmenbedingungen, sowie die Struktur der Fachinhalte. Außerdem werden die Größe der Lerngruppe und die Anzahl der benötigten Lehrpersonen skizziert. Ein weiterer Punkt, der in dieser Dimension enthalten ist, ist die Eingliederung der Unterstützung von außen, z.B. durch Eltern oder Betriebe.

Bewertende Dimension

Die bewertende Dimension stellt neben der Leitbilddimension die zweite besonders wichtige Ebene der Einführung kompetenzorientierten Unterrichts dar. Bereits vor Einführung der Kompetenzorientierung muss klar sein, wie der Unterricht bewertet, reflektiert, bzw. evaluiert werden kann. In diese Dimension gehört unter anderem die Überlegung der Bewertung von Gruppenarbeiten während des kompetenzorientierten Unterrichts. Außerdem ist es besonders wichtig, auch während des Prozesses der Einführung immer wieder einzelne Schritte zu reflektieren und zu hinterfragen, um zum erwünschten Ergebnis zu kommen.

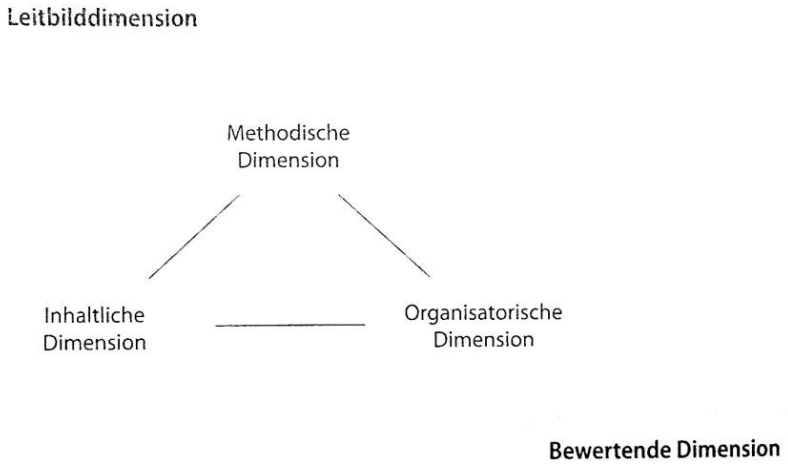


Abbildung 20: Fünf Dimensionen der Unterrichtsveränderung [45, S.146].

16 Methoden des kompetenzorientierten Unterrichts

Der kompetenzorientierte Unterricht wird vorrangig durch zwei Methoden charakterisiert, welche sich wiederum in Unterformen gliedern lassen. Dies sind das kooperative Lernen und der Projektunterricht, welche nachstehend genauer betrachtet werden.

16.1 Kooperatives Lernen

Kooperatives Lernen bezeichnet grundsätzlich zusammenarbeitendes Lernen, mit dem Ziel, den individuellen Lernerfolg der Schüler/innen zu fördern. Bei dieser Variante des gemeinsamen Lernens steht nicht die Ausbildung der sozialen Kompetenz im Vordergrund, sondern die Entwicklung kognitiver Leistungen der einzelnen Lernenden. Dabei wird, wie allgemein im kompetenzorientierten Unterricht üblich, nicht nur auf das Lernen von Fakten, sondern bevorzugt auf das Erwerben einer Handlungskompetenz in verschiedenen Gebieten Wert gelegt [45, S.58]. Diese Methode kompetenzorientierten Unterrichts fördert neben dem Lernerfolg auch die sozialen Fähigkeiten, die zum Teil auch Voraussetzung für erfolgreiches Lernen darstellen. Des Weiteren wird die Motivation der Lernenden gestärkt und somit deren Freude am Lernen erhöht. Ein durchaus wichtiger Punkt ist auch die Verbesserung der Selbsteinschätzung und Selbstbeurteilung [54, S.76f.].

Es gibt einige Stellschrauben, die ausschlaggebend für die Effektivität des kooperativen Lernens sind.

1. Individuelle Verbindlichkeit

Die Aufgabenstellung muss so gewählt werden, dass jeder einzelne Lernende verpflichtet ist, am Unterricht aktiv teilzunehmen und seinen Beitrag in der Gruppe zu erbringen. Dieses Arbeiten in heterogenen Gruppen kann nur erfolgreich sein, wenn jedes Gruppenmitglied seinen Anteil am Erfolg der Gruppe leistet. Dazu ist es besonders wichtig, dass individuelle kognitive Leistungen der Gruppenarbeit vorausgehen [45, S.60].

2. Positive Interdependenz

Das Lernen in der Gruppe wird gefördert, indem die Gruppenmitglieder auf eine bestimmte Art und Weise mehr oder weniger voneinander abhängig sind. Diese Interdependenz kann erreicht werden, indem die Lehrperson Aufgaben erteilt, die nur kooperativ zu bewältigen sind. Außerdem ist die Zusammenarbeit innerhalb der Gruppe in dem Sinn zu fördern, dass sich die Gruppenmitglieder gegenseitig behilflich sein sollen und die Lehrperson erst bei Fragen, die die gesamte Gruppe betreffen, eingreift. Durch diese positive Abhängigkeit der Lernenden untereinander, können negative Erscheinungen, wie die Verantwortungsdiffusion und der Trittbretteffekt, vermieden werden [54, S.84f.].

3. Soziale Fähigkeiten

Die Förderung sozialer Fähigkeiten ist nicht das Kernziel kooperativen Lernens, aber eigentlich dessen Voraussetzung. Durch das Arbeiten in der Gruppe wird automatisch auch die soziale Kompetenz der Lernenden gestärkt. Positiven Einfluss auf das Sozialverhalten von Schüler/innen üben spezielle Aufgaben mit sozialer Komponente, oder besonderes soziales Training aus. Außerdem ist es hilfreich, als Lehrperson ein positives Beispiel zu liefern, sowie den Lernenden regelmäßige Rückmeldung bezüglich deren sozialen Verhaltens zu geben [45, S.61].

4. Direkt unterstützende Interaktion

Eine unterstützende Interaktion der Gruppenmitglieder untereinander kann durch eine optimale Gruppenzusammensetzung gewährleistet werden. Um die Effizienz des kooperativen Lernens zu stärken, ist es wichtig, dass ein gutes Klima innerhalb der Gruppe vorliegt.

Dazu zählt, dass jeder Lernende eine bestimmte Verantwortung am Erfolg der Gruppe trägt und sich die Mitglieder einer Gruppe gegenseitig zuhören und um Hilfe bitten. Positiv auf dieses Verhalten wirkt sich neben einer passenden Zusammensetzung des Teams die Sitzordnung aus [45, S.61][54, S.88].

5. Reflexion

Besonders wichtig für den Lernerfolg der Schüler/innen ist die gemeinsame Reflexion der Ergebnisse, an welcher jeder einzelne Lernende aktiv beteiligt sein sollte. Es wird darauf eingegangen, ob die erwünschten Lernziele erreicht worden sind, sowie das Arbeiten in der Gruppe nachbesprochen [45, S.65f.].

Bei der Methode des kooperativen Lernens hat die Lehrperson die Aufgabe des Vorbereitens der passenden Aufgabenstellungen, des Instruierens und Begleitens des Prozesses, sowie der Reflexion des Unterrichts. Als typische Beispiele kooperativen Unterrichts seien das „Gruppenpuzzle“, das „Lernen im Tandem“, sowie das „Drei-Schritte-Interview“ genannt [45, S.67ff.].

16.2 Projektunterricht

Als die zweite Kernmethode kompetenzorientierten Unterrichts wird der Projektunterricht angesehen. Er zeichnet sich dadurch aus, dass der Unterricht von den Lernenden selbst strukturiert wird und die Lehrperson lediglich die Themen und die zu erreichenden Kompetenzen, sowie die zeitlichen und räumlichen Rahmenbedingungen vorgibt. Diese Methode kompetenzorientierten Unterrichts fördert das selbstständige Lernen der Schüler/innen, sowie das selbstständige Erarbeiten von Lösungen komplexer Probleme [45, S.81f.].

Der Projektunterricht gliedert sich in die nachstehend beschriebenen Phasen:

1. Ausgangs- und Orientierungsphase

In der Orientierungsphase wird von Lehrperson und Schüler/innen gemeinsam das Thema besprochen und ein allgemeiner Überblick geschaffen. Vorteilhaft ist es, eine Thematik zu wählen, die an das Interesse der Lernenden anknüpft und somit für deren Leben von Bedeutung ist. Allgemein sind für den Projektunterricht nur Themen geeignet, die von gesellschaftlicher Praxisrelevanz sind.

2. Planungsphase

   In dieser Phase des Projektunterrichts wird das genaue Ziel definiert. Des Weiteren wird ein zeitlicher und inhaltlicher Plan konzipiert, sowie ein genaues Konzept zur Erarbeitung des Ziels erstellt. In dieser Phase beginnt das selbstständige Lernen der Schüler/innen [55, S.131ff.].

3. Erarbeitungsphase

   Die Erarbeitungsphase wird durch die handlungsorientierte Konfrontation mit der Aufgabenstellung charakterisiert. Dabei variieren individuelle und kooperative Arbeitsphasen [45, S.83f.].

4. Auswertungsphase

   In der Auswertungsphase wird das Produkt des Projekts auf seine Richtigkeit überprüft, indem es an der Wirklichkeit getestet wird. Dabei werden die einzelnen Ergebnisse der Gruppen zusammengetragen und gemeinsam diskutiert.

Projektunterricht kann sich sehr positiv auf das Erwerben von Kompetenzen auswirken, ersetzt lehrergestützte Übungs- und Trainingsphasen allerdings nicht [55, S.131ff.].

17 Aufgabenstellung im kompetenzorientierten Unterricht

„The best way to learn is to do, to ask and to do. The best way to teach is to make students ask, and do. Don´t preach facts, stimulate acts“ (Mathematiker Paul Halmos [57, S. 466]).

Dieser von Paul Halmos bereits 1975 formulierte Grundgedanke wird vor allem seit den Ergebnissen bei internationalen Testungen, wie PISA, auch bei uns immer mehr und mehr als zielführender Aspekt guten Unterrichts angesehen. Insbesondere die Aufgabenstellung des naturwissenschaftlichen Unterrichts wurde und wird noch immer stark kritisiert. Dieser Unterricht soll mittels neuer Aufgabenstellungen enorm verbessert und somit ertragreicher werden. Ein besonders intensiv beanstandeter Punkt ist das bisherige Abfragen von nicht in größerem Zusammenhang stehendem Faktenwissen. Dies soll einer der Hauptgründe sein für das schlechte Abschneiden österreichischer Schüler/innen im internationalen Vergleich [56, S.118f.].

Neue Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit kompetenzorientiertem Unterricht sollen dazu beitragen, den Lernenden flexibel abrufbares, naturwissenschaftliches Wissen nahezubringen, und deren Eigenständigkeit und Problemlösefähigkeit in verschiedenen Kontexten zu fördern. Einige, einen guten kompetenzorientierten Unterricht auszeichnende Aspekte, die bei der Erstellung von Aufgaben beachtet werden sollten, werden nachstehend nach [56, S.119ff.] genauer behandelt.

17.1 Kontext der Aufgabenstellung

Wie bereits angeführt, ist es besonders wichtig, eine Aufgabenstellung oder eine Problematik in einen Kontext zu stellen, der für die Schüler/innen von Bedeutung ist. Dadurch wird deren Interesse geweckt, und somit auch deren Motivation gesteigert. Kompetenzorientierte Problemstellungen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Thematik in einem die Lernenden emotional ansprechenden Kontext gestellt wird. Entweder knüpfen die Aufgabenstellungen an das Vorwissen, bzw. an verschiedene Erfahrungen von Schüler/innen an, oder aber sie erwecken Neugierde, indem sie sich auf Interessen der Jugendlichen, und somit auf deren außerschulischen Alltag beziehen. Somit wird das situierte Lernen, das sogenannte Lernen im Kontext, der Schüler/innen gefördert und deren Fähigkeit, Wissen in verschiedenen komplexen Situationen abzurufen, gestärkt.

17.2 Vielfalt der Problemstellungen

Ein weiterer enorm wichtiger Aspekt, der beim Erstellen von Problemstellungen zu bedenken ist, ist eine gewisse Vielfalt, die in Aufgabenstellungen hineinfließen sollte. Kompetenzorientierte Problemstellungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie verschiedene Zugangsweisen zum zu lösenden Problem offen lassen, oder verschiedene Möglichkeiten bieten, Ergebnisse darzustellen. Außerdem sollte zwischen verschiedenen Aufgabenformaten , und eine Fülle an unterschiedlichem Material geboten werden. Dadurch wird unter anderem sowohl die Kreativität der Schüler/innen, wie auch das Sammeln und Umsetzen von verschiedenen Lösungswegen und Ideen enorm gefördert.

17.3 Aufgaben in verschiedenen Unterrichtsphasen

Ein durchaus vielseitig kritisierter Punkt herkömmlicher Aufgabenstellungen ist deren Einsatz im Unterricht. Üblicherweise wurden Problemstellungen meist lediglich zur Überprüfung von Wissen eingesetzt.

Ziel der neuen Aufgabenentwicklung ist es, Aufgabenstellungen für jede Unterrichtsphase zu konzipieren, um somit auf verschiedenste Kompetenzen der Schüler/innen eingehen zu können. Kompetenzorientierte Problemstellungen können bereits als Einstieg in ein Thema verwendet werden, oder auch zur Bearbeitung oder Wiederholung eingesetzt werden. Somit fällt es auch leichter, viele Aufgaben miteinander zu vernetzen und den Schüler/innen dadurch einen übergeordneten Kontext zu bieten.

17.4 Individualisierung

Kompetenzorientierte Aufgabenstellungen lassen aufgrund eines speziellen Aufgabenformates Platz für eine gewisse Individualisierung. Problemstellungen sind so konzipiert, dass um einiges mehr an Angaben vorhanden sind, als für das Lösen des Beispiels notwendig sind. So kann sich jeder Schüler und jede Schülerin den für ihn oder sie richtigen Lösungsweg suchen. Außerdem beinhaltet eine kompetenzorientierte Aufgabenstellung viele verschiedene Materialien, die unterschiedlich zur Lösung der Aufgabe eingesetzt werden können. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Darstellung der Ergebnisse. Auch hierbei sollten verschiedene Möglichkeiten gegeben sein, um diese darzustellen und für eine Reflexion zugängig zu machen.

17.5 Förderung von Kompetenzen [56, S.126ff.]

Die oben genannten Punkte fördern unter anderem die Entwicklung von Kompetenzen der Lernenden. Mittels alltags- und interessensbezogener Aufgaben wird deren Handlungsbereitschaft erhöht, und aufgrund der Vielfalt der Aufgabenstellungen eine Menge an Fähigkeiten und Fertigkeiten gefördert. Weiters werden durch kompetenzorientiertes Unterrichten nicht nur fachspezifische Kompetenzen, sondern auch sogenannte überfachliche Kompetenzen ausgeprägt. Hierzu gehören vor allem personale Kompetenzen, wie Selbsteinschätzung und Selbstbeurteilung, sowie soziale Kompetenzen, wie Teamfähigkeit bzw. das Verhalten in der Gruppe. Außerdem ist es wichtig, neben fachlicher Kompetenzen eine allgemeine Problemlösekompetenz und eine gewisse Medienkompetenz bei den Lernenden zu entwickeln.

17.6 Konzipierung von kompetenzorientierten Aufgabenstellungen [56, S.124f.]

Kompetenzorientierte Aufgabenstellungen folgen einem bestimmten Schema, anhand dessen diese aufgebaut bzw. konzipiert worden sind. Auf dieses Schema wird im Anschluss genauer eingegangen.

1. Kontext der Aufgabe

Wie bereits angesprochen, wird eine Aufgabe immer in einen gewissen Kontext gestellt, wodurch die Schüler/innen einen Bezug zur Thematik aufbauen können und eine bestimmte Lernsituation hergestellt wird. Besonders wichtig ist hierbei auch, dass motivierende und Interesse weckende Materialien zum Einsatz kommen.

2. Aktivierungsteil

Dieser Teil der Aufgabenstellung wird charakterisiert durch die tatsächliche Problemstellung. In diesem Bereich der Aufgabe werden Arbeitsaufträge genau dargelegt und die Erwartungen an die Schüler/innen definiert.

3. Hilfestellungen

Hilfestellungen sind vor allem notwendig, um eine gewisse Individualisierung möglich zu machen. Eine mögliche Hilfestellung kann z.B. eine Versuchsanleitung sein, die nicht für alle Lernenden zugänglich ist, wodurch unterschiedliche Aufgabenniveaus erzeugt werden können.

4. Ergebnisdarstellung

Kompetenzorientierte Aufgaben sind so konzipiert, dass Ergebnisse auf verschiedene Varianten dargestellt werden können. Außerdem werden Ergebnisse so festgehalten, dass sie für weitere Rückmeldungen und Diskussionen offen stehen.

17.7 Beispiel einer nach vorgestelltem Schema konzipierten kompetenzorientierten Aufgabenstellung [56, S. 125]

a) Der Aufgabenkontext

Wie wird das Wetter in den nächsten Tagen sein?

Zwei Schüler/innen einer Klasse stellen jede Woche eine Wetterprognose zusammen, indem sie Wettervorhersagen aus Zeitungen ausschneiden und diese Informationen verarbeiten.

Folgende Daten wurden gesammelt:

Tabelle 3: Darstellung der Daten eines Aufgabenbeispiels nach [56, S.125].

Angaben	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Sonnenschein	Viel	Viel	Teilweise	Wenig	Teilweise
Temperatur-Tiefst-/Höchstwert	14°C / 28°C	15°C / 30°C	16°C / 32°C	17°C / 23°C	16°C / 26°C
Luftfeuchtigkeit	Tief	Tief	Mittel bis hoch	Hoch	Mittel bis tief

b) Beispiele von Aufgaben und Aufträgen zu diesem Bereich

- Gib immer zwei Tage an!
  - Welches sind die sonnigsten Tage?
  - Welches sind die heißesten Tage?
  - Welches sind die feuchtesten Tage?
  - An welchen Tagen könnte am meisten Regen fallen?
- An welchen Tagen dieser Woche könnte es ein Gewitter geben? Nenne einen Tag und begründe deine Entscheidung!

Aufgabe 1 setzt voraus, dass Schüler/innen Daten aus Tabellen lesen und daraus sachlogische Schlüsse ziehen können. Aufgabenstellung 2 fordert die Lernenden auf Daten aus einer Tabelle zu interpretieren und daraus eine Einschätzung zu formulieren.

18 Das Experiment im kompetenzorientierten Unterricht

18.1 Allgemeines zum Experimentierunterricht

Das Experiment ist neben einfachen Beobachtungen als die wichtigste und, wenn richtig eingesetzt, als die zielführendste Methode des Chemieunterrichts anzusehen. Ganz allgemein wird ein Experiment als ein *„wissenschaftlich aufgebauter Versuch zur zielgerichteten Untersuchung einer unter definierten Bedingungen reproduzierbar hervorgerufenen Erscheinung“* (aus [58, S. 73]) definiert. Ein Experiment ist *„ein wiederholbares, objektives, d.h. vom Durchführenden unabhängiges Verfahren zur Erkenntnisgewinnung“* (aus [59, S. 277]).

Es soll im Unterricht dazu dienen, durch alltagsbezogene und an Interessen der Schüler/innen angelehnte Beispiele, die Motivation dieser zu stärken und ihnen wichtige Zusammenhänge näher zu bringen.

Außerdem wird durch richtiges Experimentieren die Wahrnehmungsfähigkeit der Lernenden gesteigert, sowie deren Blick auf übergeordnete Verknüpfungen verschärft. Des Weiteren werden Experimente im Unterricht dazu eingesetzt, bestimmte Phänomene darzustellen, und komplexe naturwissenschaftliche Konzepte einfach zu veranschaulichen. Ein Experiment kann in jeder Phase des Unterrichts eingesetzt werden, weshalb es auch so wertvoll für den Unterricht ist. Allgemein lässt sich die Durchführung eines Experiments mithilfe eines sogenannten Experimentierzykluses darstellen. Dieser ist für jede Schulstufe gleich und läuft immer nach demselben Schema ab, wobei man den einzelnen Punkten des Zyklus variable Bedeutung zukommen lassen kann [56, S.133ff.].

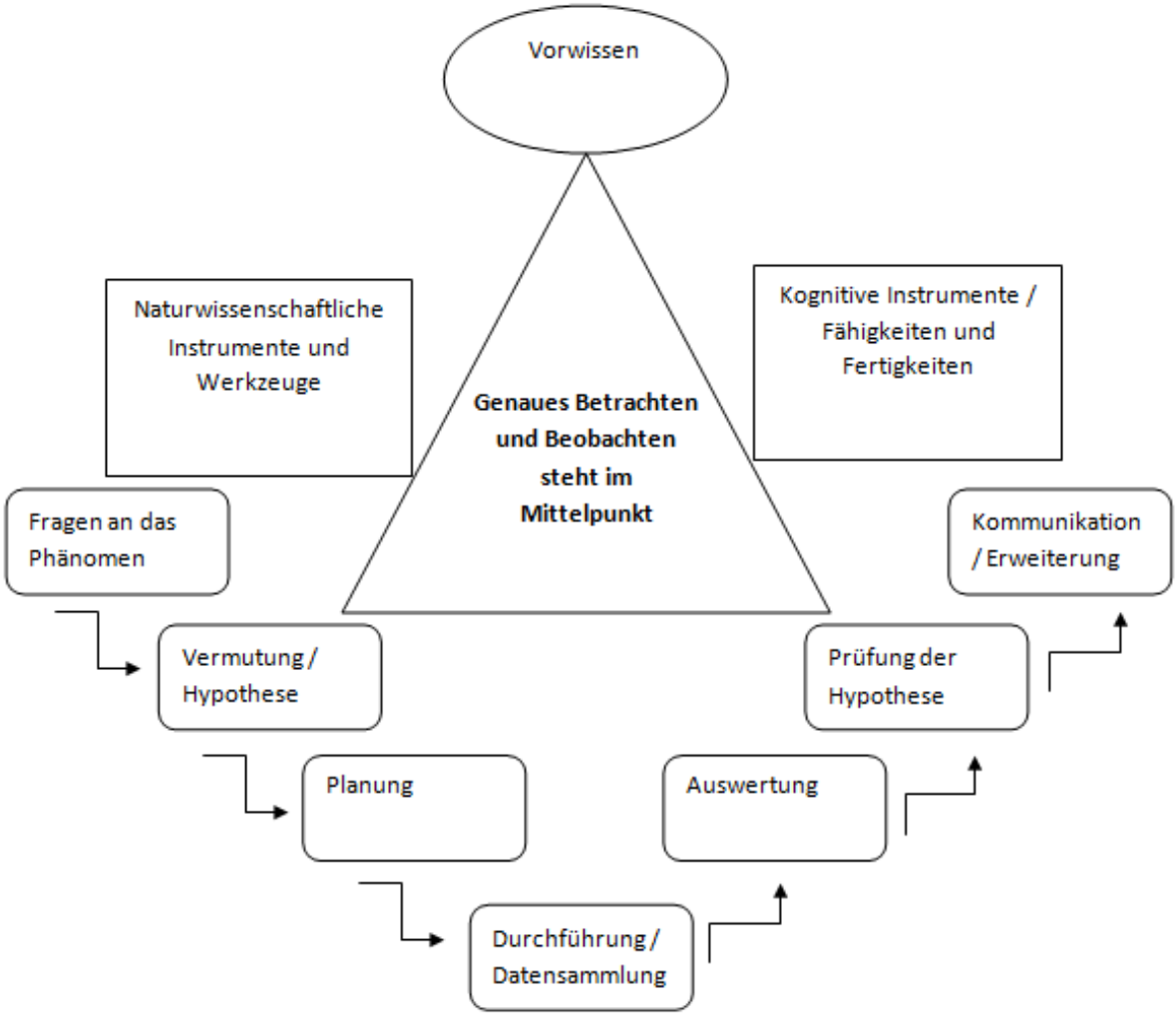


Abbildung 21: Experimentierzyklus. Angelehnt. In Anlehnung an [56, S. 135].

Der Experimentierzyklus beginnt mit dem Lenken des Vorwissens, bzw. der Erfahrungen der Lernenden auf eine bestimmte Fragestellung hin. Das engagierte Suchen nach Antworten für dieses Eingangsproblem folgt dieser ersten Begegnung mit dem Thema. Dieses Suchen nach Lösungen kann entweder anhand geleiteter, oder anhand selbstständig erarbeiteter Experimente passieren. Haben Lernende eine Antwort auf die eingangs formulierte Fragestellung gefunden, so wird eine genaue Erklärung dafür erarbeitet. In diesem Zusammenhang kann es häufig auch zu einer Problemerweiterung kommen, indem sich aus dem Ausgangsproblem neue Fragestellungen entwickeln. Eine intensive Evaluation schließt den Kreis des Experimentierzykluses ab [56, S.134f.].

18.2 Förderung von Kompetenzen mithilfe des Experimentierunterrichts

In Hinblick auf Kompetenzen und Bildungsstandards weiß man nun, dass das Experimentieren im Unterricht nicht nur zur Erhöhung der Lernmotivation oder zum Näherbringen komplexer Zusammenhänge förderlich ist, sondern, dass durch richtig im Unterricht eingesetztes Experimentieren eine Menge an Kompetenzen entwickelt werden können. Jedoch hat man in den letzen Jahren festgestellt, dass dieses vielschichtige Potential des Experimentierens in den wenigsten Fällen vollständig ausgenützt wird. Im Unterricht dominieren meist rezeptartige Experimentieranleitungen. Lernende werden beim Planen und beim Aufbau von Versuchen äußerst selten miteinbezogen. Außerdem werden Experimente häufig nur zu Demonstration eingesetzt, während Versuche zur Überprüfung bestimmter Phänomene nur vereinzelt von Lernenden selbst konzipiert werden, und diese somit selten über die tatsächlichen Ziele des Experiments Bescheid wissen.

Mageres Abschneiden österreichischer Schüler/innen bei internationalen Testungen kann teilweise auf „falsches“ Experimentieren im Unterricht zurückgeführt und folglich können Testergebnisse durch richtig eingesetztes, kompetenzorientiertes Experimentieren verbessert werden. Aufgrund dessen wurde das mannigfaltige Potential an Kompetenzen, die Lernende durch Experimentieren im Unterricht erlangen können, nun auch in die Bildungsstandards aufgenommen. Anhand einer Menge von Studien wurden die mithilfe richtigen Experimentierens zu erwerbenden Kompetenzen definiert und in Teilkompetenzen zerlegt. Außerdem wurde ein Konzept zur Überprüfung der von Lernenden aufgrund des Experimentierens erworbenen Kompetenzen eingeführt. In diesem Zusammenhang wurde auch der allgemeine Experimentierzyklus etwas verändert. Der Zyklus läuft nun nicht mehr genau nach zuvor beschriebener Reihenfolge ab, sondern kann im kompetenzorientierten Unterricht völlig variabel eingesetzt werden.

Nicht zwingend geht eine Fragestellung einem Experiment voraus. Sehr wohl kann auch erst ein durchgeführtes Experiment zu einer bestimmten Fragestellung führen und erst das daraus resultierende Ergebnis in Zusammenhang mit Schüler/innen-Erfahrungen gebracht werden.

Im österreichischen Kompetenzmodell „Naturwissenschaften 8. Schulstufe“ wird das Experimentieren in Teilkompetenzen zerlegt und in die Handlungsdimension „Erkenntnisse gewinnen: Fragen, Untersuchen, Interpretieren“ miteinbezogen. Nachstehend werden die von Schüler/innen der 8. Schulstufe zu erwerbenden experimentellen Kompetenzen angeführt [42, S.191f.].

„Ich kann einzeln oder im Team

- *zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Beobachtungen machen oder Messungen durchführen und diese beschreiben ,*
- *zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen und Vermutungen aufstellen,*
- *Zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren,*
- *Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren*“ (aus [52, S.2]).

18.3 Entwicklungsmodell experimenteller Kompetenzen

Neben der Eingliederung experimenteller Kompetenzen in Bildungsstandards, die wünschenswerte Ergebnisse des Lernens beschreiben, wurden auch Modelle erstellt, die die Entwicklung experimenteller Kompetenzen formulieren, und somit die aktiven Lernprozesse und den Unterricht darstellen.

Klahr beschreibt das Experimentieren als einen durchaus komplizierten Vorgang des Problemlösens und gliedert diesen Prozess in die folgenden drei Handlungsbereiche [60, S.14ff.]:

a) Hypothesen-Suchraum: Der Hypothesen-Suchraum wird durch das Formulieren von Hypothesen mithilfe des eigenen Vorwissens und verschiedener, auch außerschulischer Erfahrungen charakterisiert. Dazu gehört das Finden passender Hypothesen, aber auch deren Revidierung. Des Weiteren ist das Überprüfen der formulierten Hypothesen auf deren Sinnhaftigkeit ein wichtiger Punkt dieser Sparte.

Besonders bedeutend ist die an die Hypothesenbildung anschließende Formulierung der Forschungsfrage. Diese muss so klar und logisch dargestellt werden, dass nach der Durchführung des Experimentes problemlos eine Verifikation oder eine Falsifikation der eingangs formulierten Hypothese dargelegt werden kann.

b) Experimentier-Suchraum: Der Experimentier-Suchraum beinhaltet all jene Handlungen und Gedankengänge, die zur Planung eines passenden Experimentes, sowie dessen Durchführung, dienen. Hierbei ist es enorm wichtig, dass das Experiment so geplant wird, dass man auf möglichst einfachem Wege ein klares, logisch nachvollziehbares Ergebnis erlangt. In diesem Zusammenhang ist der Umgang mit Variablen, also den verschiedenen Stellgrößen eines Experiments, von Nöten.

c) Auswertung der Daten: Bei der Auswertung der Daten werden der Hypothesen- und der Experimentier-Suchraum miteinander verknüpft. Hierbei werden die Ergebnisse des Experiments ausgewertet und mit den im Hypothesen-Suchraum angenommenen Werten verglichen. Dazu gehört ein gewisses Maß an Fehlereinschätzung. Bei der Auswertung der Daten kann es häufig zu einer Erweiterung des eigentlichen Problems kommen, indem neue Fragen auftauchen. Außerdem kann die Auswertung des Experiments zu einem neuen, verbesserten Versuchsaufbau, bzw. zu einem Überdenken des Versuchsablaufes führen.

Marcus Hammann greift diese Strukturierung auf und gliedert diese Teilbereiche in Unterstufen. Diese Stufen sollen die Entwicklung der experimentellen Kompetenzen darlegen, da sie von der Stufe allgemeiner Vorstellungen hin zur hohen Stufe des Verstehens naturwissenschaftlicher Konzepte und Modelle führt [42, S.207f.].

Tabelle 4: Kompetenzentwicklungsmodell nach Hammann [42, S.208].

Stufe	Hypothesen-Suchraum	Experimentier-Suchraum	Datenauswertung
1	Experimentieren ohne Hypothesen	unsystematischer Umgang mit Variablen	Daten werden nicht auf Hypothesen bezogen
2	unsystematische Suche nach Hypothesen	teilweise systematischer Umgang mit Variablen	unlogische Analyse der Daten
3	systematische Suche nach Hypothesen	systematischer Umgang mit Variablen in bekannten Domänen	weitgehend logische Analyse der Daten, jedoch Probleme bei deren Bewertung
4	systematische Suche und Hypothesenrevision	systematischer Umgang mit Variablen in unbekannten Domänen	Daten werden in adäquater Weise zur Überprüfung von Hypothesen herangezogen

18.4 Das eXkomp-Projekt

Ein weiteres Modell, diesmal bezogen auf die Bewertung von experimenteller Tätigkeit im Unterricht, wurde 2009 von Schreiber, Theyßen und Schecker erstellt. In Anlehnung an das Kompetenzentwicklungsmodell von Hammann dient das Projekt eXkomp (Diagnostik experimenteller Kompetenz) der Messung der durch Experimentieren erworbenen Kompetenzen. Im Gegensatz zu Bildungsstandards, die experimentelle Fähigkeiten allein nur mittels schriftlicher Tests abprüfen, liegt der Schwerpunkt dieses Projekts bei der tatsächlichen Durchführung des Experiments. Dabei werden der Hypothesen-Suchraum und das Auswerten von Daten nur am Rande miteinbezogen. Mithilfe von eXkomp sollen neben experimentellem Wissen vor allem handlungs- und prozessbezogene Daten erfasst werden können, was allein nur anhand schriftlicher Wissensüberprüfungen nicht möglich ist. Das Modell ist in die drei übergeordneten Bereiche Planung, Durchführung und Auswertung gegliedert, welche wiederum durch mehrere Teilkompetenzen beschrieben werden. Aufgrund dieser Teilkompetenzen ist dieses Projekt nahe der Bildungsstandards anzusiedeln.

Allerdings sind in diesem Modell keine Entwicklungsstufen von Kompetenzen angeführt, was für das Messen von Kompetenzen zwar allgemein nicht notwendig ist, wodurch aber deren Entwicklung nicht berücksichtigt werden kann. Ein großer Vorteil dieses Modells ist dessen einfache Struktur. Die logische und nicht sehr aufwändige Methode zur Messung experimenteller Kompetenzen kann folglich von jeder Lehrperson in jeder beliebigen Klasse zu jedem Experiment eingesetzt werden. eXkomp kann somit sowohl als Hilfe und Orientierung für die Lehrperson, als auch zur Einschätzung des eigenen Kompetenzniveaus der Schüler/innen dienen [42, S.208f.][60, S.23f.]

Tabelle 5: Teilkompetenzen eines Experimentes nach Schreiber, Theyßen & Schecker [42, S.209].

Planung	**Durchführung**	**Auswertung**
Vorgegebene Fragestellung klären	Geräte zusammenfassen	Messdaten verarbeiten
Fragestellung entwickeln	Versuchsanordnung aufbauen	Messdaten verarbeiten
Erwartungen formulieren	Messungen durchführen	Ergebnis auf Fragestellung / Erwartung / Hypothese beziehen
Hypothesen bilden	Messungen dokumentieren	Ergebnis auf Fragestellung / Erwartung / Hypothese beziehen
Versuchsplan entwerfen		Umgang mit Problemen/ Fehlern

18.5 Das Spinnenmodell experimenteller Kompetenzen [42, S.209f.]

Das Spinnenmodell wurde im Rahmen des Hamburger Schulversuchs „**alles>>könner**“ zur Erleichterung kompetenzorientierten Experimentierens im Unterricht entwickelt. Es gibt Antwort auf die Frage, wie es denn gelingen kann, den vielen Anforderungen und Herausforderungen beim Experimentieren gerecht zu werden, und es veranschaulicht den daraus resultierenden Lernzuwachs. Das Spinnenmodell kann von Lehrpersonen sowohl zur Planung von Experimentiereinheiten, als auch zu deren Evaluation verwendet werden. Außerdem dient es den Schüler/innen als Medium, sich über ihre durch das Experimentieren erworbenen Kompetenzen klar zu werden.

Das Spinnennetz ist in sieben Abteilungen gegliedert, in welche sich sowohl die in den Bildungsstandards zusammengefassten Kompetenzen, als auch die nach eXkomp formulierten Teilkompetenzen eingliedern lassen. Somit ist es möglich, Experimentiereinheiten nach Teilkompetenzen auszurichten.

Dazu gibt die Lehrperson bei der Planung eines Experimentes die entsprechende Ausprägung der von den Lernenden zu erwerbenden Teilkompetenzen im Spinnennetz an. Nach dem Experimentieren können die Schüler/innen ihren Kompetenzerwerb nach gleichem Prinzip selbst überprüfen und einschätzen.

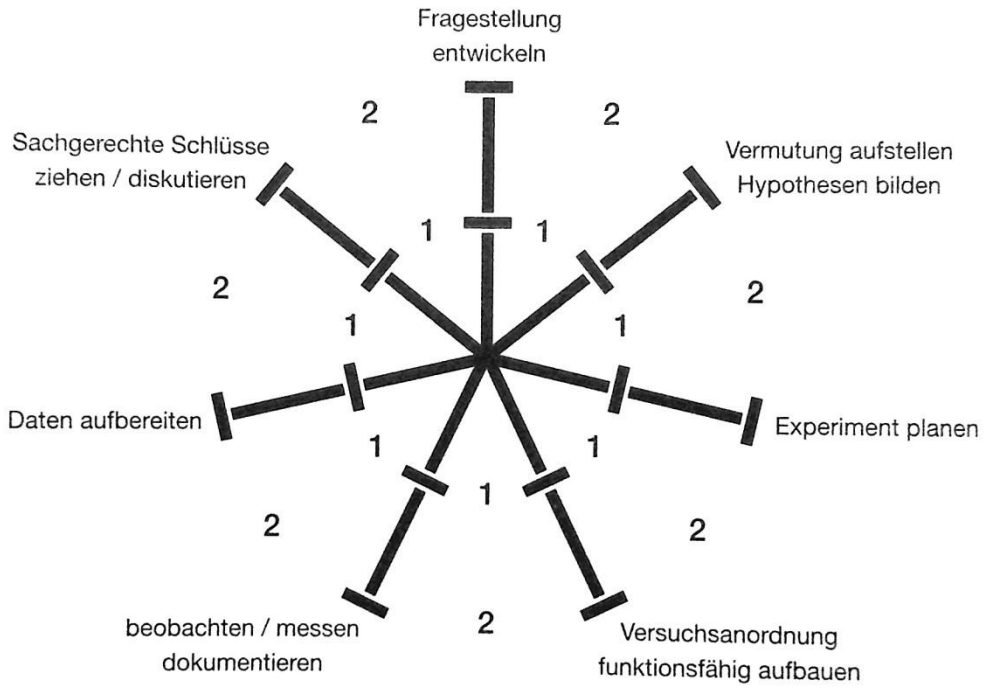


Abbildung 22: Spinnenmodell experimenteller Kompetenzen. Für die Planung gilt: 0 = unwichtig, 1 = bedeutsam, 2 = sehr wichtig; Für die Diagnose gilt: 0 = niedriges Niveau, 1 = mittleres Niveau, 2 = hohes Niveau [42, S.210].

19 Planung von Experimenten nach dem Spinnenmodell

Die Grundlagen des Spinnenmodells wurden bereits im vorhergehenden Kapitel dargestellt. Dieses Modell wird dazu verwendet, Experimente zum Thema Enzyme kompetenzorientiert zu planen, und auf genau jene spezifischen Kompetenzen hinzuweisen, die mittels eines bestimmten Experimentes gefördert werden können.

Nachstehend werden dazu zwei mögliche Experimente zum Thema Enzyme mit den dazugehörigen kompetenzorientierten Aufgabenstellungen vorgestellt und mittels Spinnenmodell wird dargestellt, welche Kompetenzen dadurch tatsächlich gefordert und gefördert werden können.

19.1 Experiment 1: Hemmung von Enzymen durch Schwermetalle

Den Schüler/innen wird folgender Beschluss vorgelegt. Sie haben die Aufgabe, sich verschiedene Hypothesen zu überlegen, aus welchem Grund es zu dieser Richtlinie gekommen ist. Somit steht die Forschungsfrage bereits fest. Den Lernenden werden verschiedene Chemikalien und Geräte vorgelegt, anhand derer sie ein Experiment planen sollen, mittels diesem danach die Forschungsfrage zu beantworten ist, bzw. ihre Hypothesen bestätigt oder widerlegt werden können.

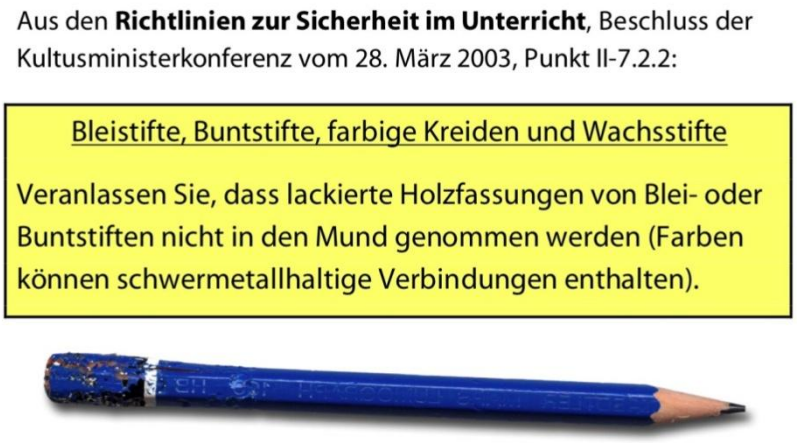


Abbildung 23: Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht zum Thema Schwermetalle im Bleistift [89].

Den Lernenden stehen folgende Chemikalien und Materialien für die Planung und Durchführung des Experimentes zu Verfügung: 3%ige Wasserstoffperoxid-Lösung, NaOH, HCl, destilliertes Wasser, Kupfersulfatlösung, Bleinitratlösung, Kartoffel, Hefe, Leber, Schnappdeckelgläser, Reagenzgläser, Bechergläser, Heizplatte.

Die Schüler/innen haben die Aufgabe, sich aus den vielen Materialien die für ihren Versuch adäquaten zu suchen, und damit ein passendes Experiment zu planen. Das Ergebnis des Experiments wird entsprechend dokumentiert. Kann die Forschungsfrage mit dem geplanten Experiment nicht beantwortet werden, so muss erneut ein Experiment konzipiert werden.

Die Lernenden führen das Experiment zielbringend durch, wenn sie zwei Versuchsansätze mit entweder einem Stück einer Kartoffel, Hefe oder Leber in Wasser erstellen. Einer dieser Ansätze wird mit einer Schwermetalllösung versehen, bevor anschließend beide Ansätze mit Wasserstoffperoxid versetzt werden.

Sowohl Leber, Kartoffel, als auch Hefe besitzen das Enzym Katalase, welches als Oxidoreduktase dazu befähigt ist, Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff zu spalten. Dies macht sich durch ein Aufschäumen bemerkbar. Schwermetall-Ionen führen als irreversible Inhibitoren zur Blockade dieser Reaktion, was dazu führt, dass kein Schäumen der Lösung zu sehen ist.

Da beim Kauen auf Blei- bzw. Buntstiften Schwermetallionen aufgenommen werden können und diese die oben beschriebene Wirkung auf Enzyme zeigen, wurde dies mittels einer Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht untersagt.

Laut Spinnenmodell führt diese Aufgabenstellung zur Förderung der experimentellen Kompetenzen „Hypothesen erstellen“, „Experiment planen“, „Versuch funktionsfähig aufbauen“ und „Schlüsse ziehen“. Dabei werden die Kompetenzen „Fragestellung entwickeln“, „Daten aufbereiten“, sowie „Messen und Dokumentieren“ eher vernachlässigt.

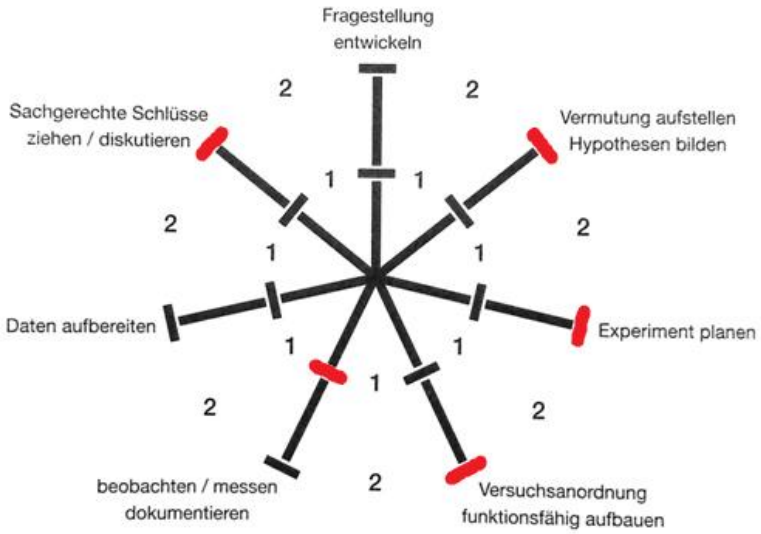


Abbildung 24: Spinnenmodell zum Experiment mit Enzymen und Schwermetallen nach beschriebener Aufgabenstellung.

19.2 Experiment 2: Abhängigkeit der Katalase-Reaktion von der Temperatur

Dieses Experiment beginnt damit, dass Schüler/innen damit beauftragt werden, den Versuch, wie in nachstehender Abbildung beschrieben, aufzubauen. Nach dem funktionsfähigen Aufbau der Apparaturen haben sich die Lernenden eine dem Versuchsaufbau angepasste Fragestellung zu überlegen. Sie müssen herausfinden, welche Forschungsfrage anhand eines solchen Versuchsaufbaus beantwortet werden kann.

Bei der Durchführung des Experiments wird das Ergebnis genau dokumentiert und auf Millimeterpapier in Form eines Diagrammes festgehalten. Das Resultat des Experiments wird diskutiert und dessen Ursache überlegt.

Wie jedes weitere Enzym besitzt auch die in der Kartoffel enthaltene Katalase eine gewisse Temperaturabhängigkeit. Dieses Enzym, welches in Organismen zur Spaltung des schädlichen Wasserstoffperoxids enthalten ist, arbeitet bei 37°C am effizientesten, während die Reaktion bei Temperaturen um 0°C recht langsam verläuft.

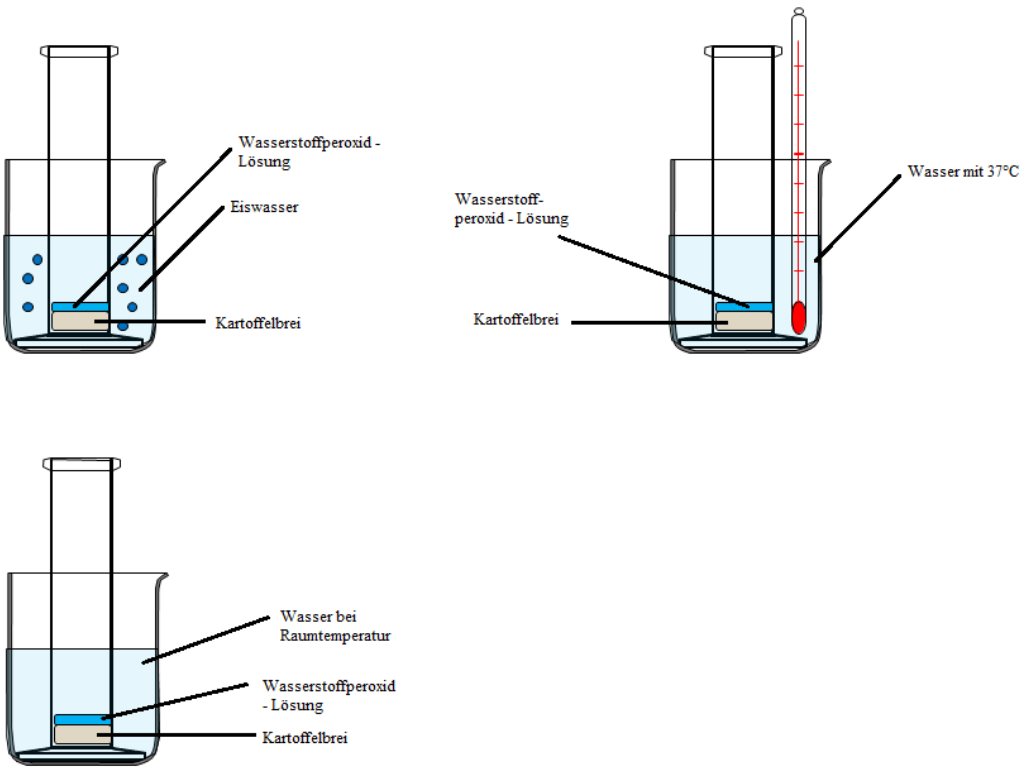


Abbildung 25: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Katalase.

Mittels dieses Experiments werden laut Spinnenmodell die experimentellen Kompetenzen „Fragestellung ermitteln“, „Versuch funktionsfähig aufbauen“, „Beobachten, Messen, Dokumentieren“ und „Schlüsse ziehen und Diskutieren“ gefördert. Im Gegensatz dazu werden die Kompetenzen „Hypothesen erstellen“, „Experiment planen“ und „Daten aufbereiten“ in den Hintergrund gestellt.

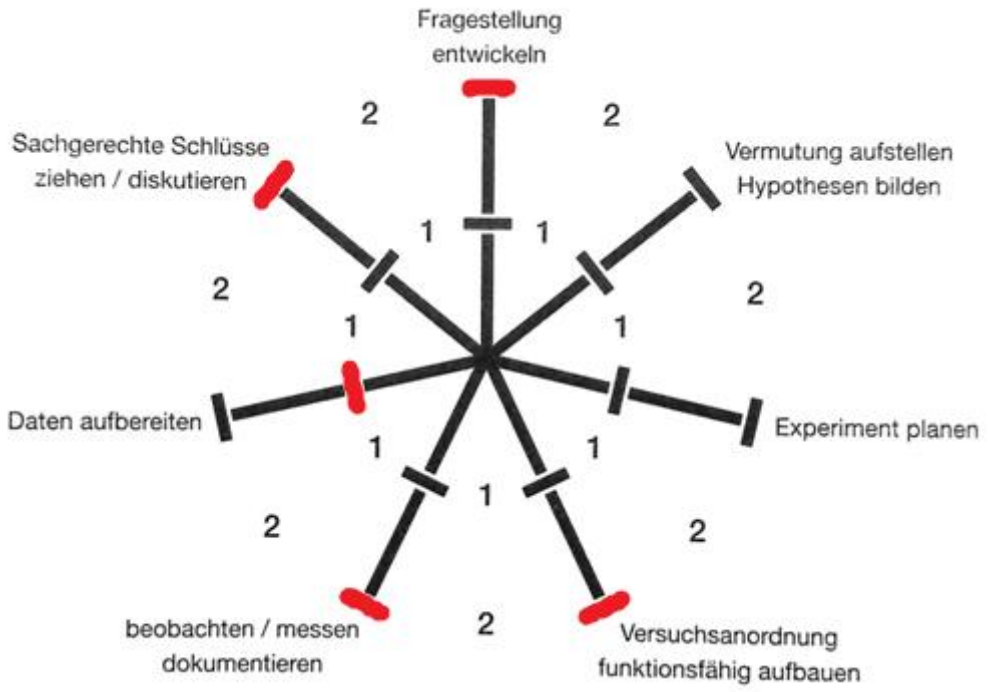


Abbildung 26: Spinnenmodell zum Experiment zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Katalase.

20 Lesekompetenz im naturwissenschaftlichen Unterricht

Nicht nur im Deutschunterricht, sondern auch in den naturwissenschaftlichen Gegenständen gilt das Lesen als eine zentrale Kompetenz, als eine so genannte Schlüsselkompetenz. Die Lesekompetenz bildet die Grundlage der Weiterbildung und des selbständigen Lernens und ist außerdem ein wichtiger Aspekt, der im gesellschaftlichen Leben eine durchaus beträchtliche Rolle spielt [61, S.7ff.][64, S.1]. Leider zeigen jedoch viele Schüler/innen laut PISA deutliche Mängel in diesem Bereich und liegen in der Sparte Lesekompetenz nur im schlechten Mittel aller OECD-Länder, wodurch eine enorme Förderung der Lesekompetenz auch im naturwissenschaftlichen Unterricht erstrebenswert ist [62].

Allgemein wird Lesekompetenz als *„die Fähigkeit, geschriebene Texte unterschiedlicher Art in ihren Aussagen, ihren Absichten und ihrer formalen Struktur zu verstehen und in einem größeren Zusammenhang anordnen zu können, sowie in der Lage zu sein, Texte für verschiedene Zwecke sachgerecht zu nutzen“* beschrieben (aus [63, S.11]).

Um Texte verstehen zu können, müssen kognitive Leistungen mit visuellen Eindrücken und deren Verarbeitung gekoppelt werden, was ein gewisses Arbeitsgedächtnis voraussetzt. Des Weiteren wird zur kompetenzorientierten Verarbeitung von Texten, zum sinnerfassenden Lesen, ein bestimmtes Maß an Sach- und Weltwissen benötigt. Somit gilt die Lesekompetenz als fachspezifisch. Kompetenzorientiertes Lesen kann durch das Aufbauen dieser grundlegenden Voraussetzungen trainiert und gefördert werden. Dazu ist es enorm wichtig, die Lesekompetenz immer wieder in verschiedenen Zusammenhängen in den Unterricht einzubringen [64, S.2ff.].

Die Lesekompetenz wird in der PISA-Studie in fünf Kompetenzstufen eingeteilt. Diese Stufen geben die Ausprägung der Kompetenz bei Schüler/innen an, welche abhängig ist von der Fähigkeit, Beispielaufgaben unterschiedlicher Schwierigkeit zu lösen. Die Schwierigkeit der Aufgaben variiert wiederum unter anderem zwischen der Komplexität der eingesetzten Texte, der Darstellung wichtiger Informationen, oder der Anzahl der von den tatsächlichen Informationen ablenkenden Elemente. Eine solche Kompetenzstufe wird charakterisiert durch die drei Elemente „Informationen ermitteln“, „Textbezogenes Interpretieren“ und „Reflektieren und Bewerten“, welche im internationalen Test getrennt ermittelt werden [61, S.8f.]. Als Beispiel einer solchen Kompetenzstufe wird nachstehend die höchste der zu erreichenden Stufen der Lesekompetenz beschrieben (aus [61, S.8]):

„Schülerinnen und Schüler, die die Kompetenzstufe V (Expertenstufe) erreichen, sind in der Lage:

- *verschiedene tief eingebettete Infos zu lokalisieren und zu organisieren, auch wenn Inhalt und Form des Textes nicht vertraut sind und indirekt erschlossen werden muss, welche Infos für Aufgaben relevant sind: Informationen ermitteln*
- *einen Text mit unvertrautem Thema und Format vollständig und im Detail zu verstehen: Textbezogenes Interpretieren*
- *unter Bezugnahme auf spezialisiertes Wissen einen Test kritisch zu bewerten oder Hypothesen über Infos im Text zu formulieren, auch wenn die relevanten Konzepte den Erwartungen widersprechen: Reflektieren und Bewerten"*

20.1 Förderung der Lesekompetenz im naturwissenschaftlichen Unterricht

Besonders naturwissenschaftliche Sachtexte zeigen sich für Schüler/innen als äußerst komplex. Sie liefern meist eine Menge an Informationen, Daten und Fakten in einer detaillierten, komprimierten und unpersönlichen Form. Des Weiteren werden neben Fachsprache und komplizierter Satzstrukturen viele Skizzen, Graphiken, Tabellen oder Diagramme in die Texte eingebracht. Dieser häufig auftretende Grundaufbau naturwissenschaftlicher Schriften ist für Lernende sehr fordernd, weshalb dessen kompetentes Bearbeiten besonders gefördert werden muss [65].

Zur Förderung der Lesekompetenz im naturwissenschaftlichen Unterricht wurden bereits viele verschiedene Konzepte und Modelle erstellt. In dieser Arbeit möchte ich näher auf die „10 Lesestrategien im Unterrichtsgegenstand Chemie" eingehen, die im Auftrag des BMUKK von E. Kulnigg formuliert worden sind. Hierbei handelt es sich um zehn verschiedene Vorgehensweisen, einen Text zu bearbeiten, die bei situationsgemäßer Anwendung im Unterricht dazu dienen, die Lesekompetenz von Lernenden zu fördern [66, S.4f.]. Nachstehend werden diese zehn verschiedenen Strategien nach [66] näher beschrieben.

20.1.1 10 Lesestrategien im Unterrichtsgegenstand Chemie

1. Beantworten von Fragen zum Text [66, S.6ff.]
   Diese recht simple Strategie zur Förderung der Lesekompetenz zeichnet sich dadurch aus, dass Schüler/innen Fragen zu einem bestimmten Text beantworten müssen. Diese Fragen sind in die folgenden 4 Kategorien gegliedert:

a) Fragen zum Erhalt von Informationen: Die Antwort befindet sich im Text
b) Fragen zum umfassenden Textverständnis: Zur Beantwortung ist die Kombination mehrerer Textstellen notwendig
c) Fragen zur Reflexion und Bewertung: Zur Beantwortung ist die Kombination von Textstellen mit dem Wissen der Lesenden notwendig
d) Fragen zur Auslegung eines Textes: Zur Beantwortung ist allein das Wissen der Schüler/innen gefragt

Diese Lesestrategie führt auf einfachem Wege dazu, dass sich Lernende intensiv mit dem zu lesenden Text beschäftigen. Außerdem haben sie durch die Beantwortung der Fragen bereits einen Fragenkatalog ausgearbeitet, den sie für Prüfungen oder Wiederholungen verwenden können.

2. Formulieren und Beantworten von Fragen an den Text [66, S.11ff.]
   Die zweite Lesestrategie ist ähnlich der ersten, jedoch etwas komplexer und effektiver. Während das Beantworten von Fragen recht häufig im Unterricht eingesetzt wird, findet das eigenständige Verfassen dieser wenig Bedeutung. Hierbei wird den Lesenden aufgetragen, Fragen zu einem Text zu formulieren. Diese Fragen sind in die unter Lesestrategie 1 beschriebenen Kategorien einzuordnen. Dadurch befassen sich Schüler/innen neben dem Inhalt des Textes auch mit deren Vorwissen und Erfahrungen zu diesem Thema.

3. Text strukturieren [66, S.16ff.]
   Für sinnerfassendes Lesen ist ein gut strukturierter Text mit passenden Zwischenüberschriften besonders wichtig. Diese Lesestrategie hat den Auftrag, einen Text in Sinnesabschnitte zu unterteilen und an angebrachten Stellen entsprechende Zwischenüberschriften anzubringen. Außerdem sollen von den Lesenden Randbemerkungen und Bewertungen des Textes angegeben werden.

4. Text mit dem Bild lesen [66, S.19f.]
   Um kognitive Eindrücke mit visuellen Eindrücken zu koppeln, und somit verschiedene Gehirnregionen zu beanspruchen, werden vermehrt Grafiken, Tabellen, Diagramme usw. in Texte eingefügt. Jedoch können Lernende nicht automatisch mit diesen Zusatzinformationen umgehen, weshalb dieses durch die vierte Lesestrategie gefördert wird.

Hierbei haben die Lesenden die Aufgabe, sich sowohl mit dem Text, als auch mit den darin enthaltenen Grafiken zu beschäftigen, und deren Inhalt zu vergleichen. Somit lernen Schüler/innen die Kernaussagen von Bildern oder Diagrammen kompetent zu lesen und für ihren Lernerfolg einzusetzen.

5. Farborientiert markieren [66, S.21ff.]

   Durch farborientiertes Markieren bekommen Lesende einen besseren Zugang zum Text, außerdem können sie sich mithilfe dessen einen besseren Überblick über den Inhalt verschaffen, wodurch das wirkliche Verstehen des Textes gefördert wird. Auftrag dieser Lesestrategie ist es, alle Fachbegriffe des Textes mit unterschiedlichen Farben zu markieren (Nomen, Verben…) und anhand dieser den Inhalt strukturell darzustellen.

6. Text in eine andere Darstellungsform übertragen [66, S.24ff.]

   Für Schüler/innen ist es wichtig, Informationen aus einem Text herauslesen zu können, um diese anschließend z.B. zum Verfassen eines weiteren Schreibens oder zur Beschreibung eines Experiments verwenden zu können. Viele Lernende nutzen dazu das sogenannte „Copy and Paste“-Verfahren, weil sie richtiges Entnehmen relevanter Informationen nicht beherrschen. Diese Lesestrategie beauftragt die Lesenden, den Inhalt des Textes in Form eines Begriffsnetzes, einer Zeichnung oder einer Animation etc. darzustellen. Dadurch erfassen die Lernenden tatsächlich die Inhalte, die von Bedeutung sind, und stellen diese untereinander in eine Verbindung. Somit wird neben der Lesekompetenz auch die Kreativität der Schüler/innen gefordert und gefördert.

7. Text expandieren [66, S.28f.]

   Stark komprimierte Texte sind für Lernende häufig sehr schwierig zu verstehen, da sehr viele Informationen und Fachbegriffe neben wenig Begleittext angeordnet sind. Eine Hilfe, auch solch komplexe Texte sinnerfassend lesen zu können, bietet diese siebente Lesestrategie. Sie fordert auf, stark komprimierte Texte neu zu verfassen, und sie mit Zusatzinformationen zu versetzen. Hierbei sollen unter anderem Fremdwörter erklärt werden, oder Sätze mittels Hilfswörter ausgeschmückt werden. Dazu stehen den Schüler/innen verschiedene Literatur sowie das Internet zur Verfügung. Hilfreich ist es außerdem, den Lernenden den Auftrag zu geben, den komprimierten Text für eine/n Mitschüler/in oder für verschiedene andere Personen neu zu verfassen.

8. Verschiedene Texte zum Thema vergleichen [66, S.30ff.]

   Zu jedem im Unterricht durchgenommenen Thema gibt es Texte en masse. Diese sollten auch genutzt werden, denn die Lernenden spricht nicht jedes Format, jede Formulierung oder jede Strukturierung von Texten gleichermaßen an. Hierbei ist es sinnvoll, Schüler/innen verschiedene Texte zu einem Themengebiet vergleichen, und deren Inhalte gegenseitig ergänzen zu lassen. So lernen diese mit unterschiedlichen Textsorten umzugehen, und auch aus für sie nicht ansprechenden Texten relevante Information herauszulesen.

9. Schlüsselwörter suchen und den Text zusammenfassen [66, S.36]

   Die neunte Lesestrategie ist bereits recht komplex und nur für Schüler/innen geeignet, die bereits ein gutes Textverständnis mitbringen. Bei dieser Lesestrategie wird verlangt, aus einem Text Schlüsselwörter zu schreiben, und anhand derer im Anschluss eine Zusammenfassung des Gelesenen zu formulieren. Hierbei ist es wichtig, dass die Lernenden die wirklich relevanten Aspekte aus dem Text herauslesen können und den Teilen, die weniger von Bedeutung sind, auch weniger Beachtung schenken.

10. Mehr-Phasen-Schema [66, S.37ff.]

    Das Mehr-Phasen-Schema stellt die Königsdisziplin der Lesestrategien dar. Dieses Schema gilt als sehr zeitaufwändig und komplex, und ist deshalb nur bei sehr langen Texten oder ganzen Lernabschnitten, sowie für Lernende mit enormer Leseerfahrung anzuwenden. Hierbei werden verschiedene Lesestrategien gekoppelt, was sich sehr effektiv auf den Lernerfolg, sowie auf die Ausbildung der Lesekompetenz auswirkt. Nachdem Lernende sich einen Überblick über den Text verschafft haben, werden Fragen erstellt und beantwortet, sowie einzelne Teile in verschiedene Darstellungsformen überführt oder neu strukturiert. Es können hier alle genannten Lesestrategien zum Einsatz kommen. Des Weiteren wird der Inhalt des Textes mit dem Vorwissen der Schüler/innen in Verbindung gebracht und somit deren Lernfortschritt gesteigert.

20.2 Einsatz der Lesestrategien im Chemieunterricht zum Thema Enzyme

Die zehn vorgestellten Lesestrategien können im enzymatischen Unterricht breite Anwendung finden, da sehr viele variantenreiche Texte zu diesem Themengebiet vorliegen. Besonders wichtig ist es außerdem, neben dem Arbeiten mit beliebigen Texten auch das Schulbuch in den Unterricht mit einzubeziehen. So lernen Schüler/innen, dieses positiv zu nützen und zielbringend einzusetzen.

Im folgenden Kapitel wird eine der vorstehend dargestellten Lesestrategien genauer betrachtet und in Form einer Aufgabenstellung zum Thema Enzyme im Chemieunterricht präsentiert.

20.3 Einbindung der Lesestrategie „Text mit dem Bild lesen“ in den enzymatischen Unterricht

Wie bereits beschrieben, dienen Lesestrategien der Förderung sinnerfassenden Lesens. Dabei wird in diesem Kapitel auf die „Lesestrategie 4“ mit der Kombination von Text und Bild und dem daraus resultierenden Lernerfolg für Schüler/innen näher eingegangen.

In diesem Zusammenhang wurden von mir Illustrationen zu den sechs verschiedenen Enzymklassen erstellt. Diese sollen es den Lernenden erleichtern, die komplexen Mechanismen hinter diesen Klassen zu verstehen und diese somit leichter differenzieren zu können.

Bei jeder enzymatischen Katalyse wird aufgrund einer Erniedrigung der Aktivierungsenergie eine Reaktion beschleunigt. Jedoch kann dies auf sechs verschiedene Weisen erfolgen. Diese unterschiedlichen Reaktionsmechanismen der verschiedenen Enzymklassen wurden in Kapitel 5 genau beschrieben und werden nun anhand der von mir erstellten Illustrationen dargestellt. Beispielhaft werden nachstehend die Animation für Transferasen, sowie die für Hydrolasen dargestellt. Im Anhang dieser Arbeit sind diese Abbildungen vollständig angeführt.

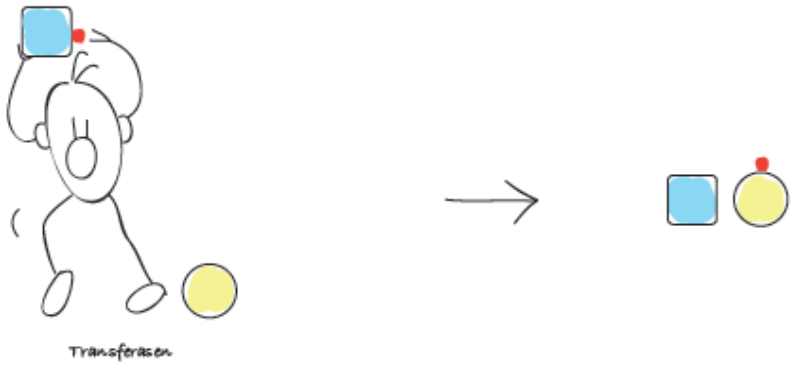


Abbildung 27: Illustration des Reaktionsmechanismus von Transferasen.

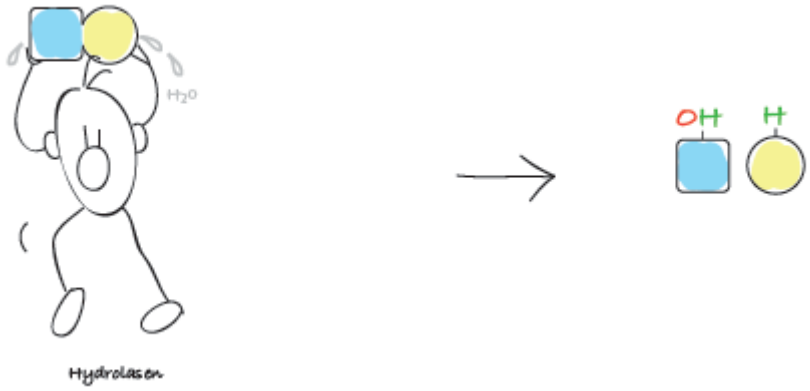


Abbildung 28: Illustration des Reaktionsmechanismus von Hydrolasen.

20.4 Einsatz von Illustrationen zum Thema Enzymklassen im Unterricht

Eine Variante der Einbindung in den Unterricht stellt das Koppeln der Lesestrategie mit dem Experimentieren im Unterricht dar. Beim Experimentieren ist es bereits notwendig, den Arbeitsauftrag sinnerfassend lesen zu können, um überhaupt erst ein Experiment durchführen zu können. Das Lesen kann jedoch beim Experimentieren auch aktiv gefördert werden, indem man weitere, das Experiment betreffende Aufgabenstellungen einbringt.

Als Beispiel wird ein Experiment mit der Oxidoreduktase Katalase vorgestellt.

Schüler/innen weisen die Wirkung dieses Enzymes nach, indem sie einen wässrigen Kartoffelbrei mit Wasserstoffperoxid-Lösung versetzen. Infolge der Reaktion entstehenden Sauerstoffs zeigt sich ein Schäumen.

Wie in Kapitel 22.3 beschrieben, dient die Katalase als eine Oxidoreduktase der Spaltung des für die meisten Organismen schädlichen Wasserstoffperoxids in Wasser und Sauerstoff. Diese Spaltung erfolgt in Form einer Redox-Reaktion.

Nach der Durchführung dieses Experiments haben die Schüler/innen nun die Aufgabe, anhand nachstehender Illustration den Reaktionsmechanismus der Katalase-Reaktion zu erklären. Dabei wird ihnen ein Begleittext zur Verfügung gestellt, der zusätzliche Informationen zum Reaktionsmechanismus liefert. Somit haben die Lernenden die Möglichkeit, diesen Ablauf der mittels Experiment eigenständig herbeigeführten Reaktion, sowohl bildlich, als auch in Form eines Textes aufzunehmen. Dies hilft den Schülern/innen, den Mechanismus zu verstehen und mit eigenen Worten beschreiben zu können.

In dieser Arbeit wird auf passende Begleittexte nicht näher eingegangen.

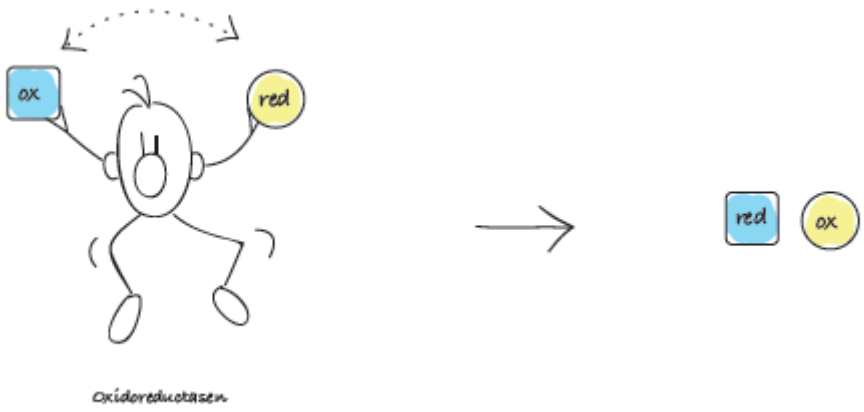


Abbildung 29: Illustration des Reaktionsmechanismus von Oxidoreduktasen.

21 Eingliederung des Themas „Enzyme“ in den Unterricht einer BHS – am Beispiel einer HLW

In Österreich gibt es einige verschiedene berufsbildende höhere Schulen mit teilweise recht unterschiedlichen Stundentafeln und Lehrplänen. Ich werde mich in dieser Arbeit rein auf den Unterricht in HLWs (Höhere Lehranstalt für wirtschaftliche Berufe) konzentrieren.

21.1 Stundentafel einer HLW

Der Lehrplan für HLWs von 2003 legt in der Stundentafel für die naturwissenschaftlichen Fächer lediglich drei Chemiewochenstunden im ersten Jahrgang fest. Für die restlichen vier Schuljahre ist kein Chemieunterricht vorgesehen [67, S.29].

5. Naturwissenschaften:							
5.1 Biologie und Ökologie	-	-	3	2	-	5	III
5.2 Chemie	3	-	-	-	-	3	(III)
5.3 Physik	-	2	-	-	-	2	(III)
5.4 Mathematik und angewandte Mathematik	2	2	2	2	-	8	(I)

Abbildung 30: Ausschnitt aus dem Lehrplan für HLWs aus dem Jahr 2003 [67, S. 29].

Ab dem Schuljahr 2014/15 gibt es jedoch eine neue Stundentafel, in welcher die naturwissenschaftlichen Fächer Chemie, Physik und Biologie und Umweltkunde zum neuen Gegenstand „Naturwissenschaften“ zusammengefasst werden. Somit wird fächerübergreifender Unterricht im Bereich Naturwissenschaften gefördert und ein allgemeines naturwissenschaftliches Verständnis herbeigeführt. In dieser neuen Stundentafel sind zwei Wochenstunden Naturwissenschaften pro Jahrgang vorgesehen [68, S.1].

5. Mathematik, Naturwissenschaften und Ernährung:						
5.1 Angewandte Mathematik[4]	2	2	2	2	2	10
5.2 Naturwissenschaften[5]	2	2	2	2	2	10
5.3 Ernährung und Lebensmitteltechnologie[4]	0	2	2	2	0	6

Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Entwurf des neuen Lehrplans für HLWs. Stand 2012 [68, S. 1].

Aufgrund dieser neuen Stundentafel lässt sich das Thema „Enzyme“ wesentlich einfacher in den Unterricht eingliedern. Bei einem Chemieunterricht von drei Wochenstunden ist es meist aus Zeitgründen nicht möglich auf diese Biokatalysatoren einzugehen. Bei der erhöhten Anzahl an Wochenstunden des Gegenstandes Naturwissenschaften kann man allerdings in den Themenkomplex Enzyme neben chemischen auch biologische bzw. physikalische Aspekte sehr gut in den Unterricht einbringen.

21.2 Lehrplan des Unterrichtsgegenstandes Naturwissenschaften

Als allgemeiner didaktischer Grundsatz für die Naturwissenschaften gilt, dass *„die Arbeitsweise der Naturwissenschaften (z.B. Experimente, praktische Übungen) und Exkursionen durchgängig in den Unterricht zu integrieren sind“* (aus [68, S. 7]).

Nachstehend werden einige allgemeine Bildungs- und Lehraufgaben genannt, die sich besonders auf das Fach Chemie beziehen und für das Thema „Enzyme“ im Unterricht ansprechend sind. Diese Ziele sind ebenfalls im neuen Lehrplan für HLWs zu finden.

Die Schülerinnen und Schüler

- *kennen fachspezifische Methoden, sowie Problemlösestrategien und können diese praxisbezogen anwenden*
- *beherrschen die Fachsprache und können sie situationsgerecht anwenden*
- *können Experimente planen, durchführen und mit geeigneten Mitteln dokumentieren*
- *erkennen Strukturen, Zusammenhänge und Wechselwirkungen als Grundelemente eines naturwissenschaftlichen Weltverständnisses*
- *können sich über neue Entwicklungen und Technologien informieren, können diese kritisch hinterfragen und deren Nutzen und Risiken beschreiben und bewerten* (aus [68, S. 58]).

Betrachtet man den vom Lehrplan für die einzelnen Jahrgänge vorgesehenen Lehrstoff, sowie die vorliegenden Bildungs- und Lehraufgaben, so scheint es plausibel, das Stoffgebiet rund um das Thema „Enzyme“ im 2. Jahrgang zu erarbeiten. Hier stehen neben der organischen Chemie und dem Experimentieren, Nährstoffe und Stoffkreisläufe im Mittelpunkt.

Nachstehend werden die entsprechenden Bildungs- und Lehraufgaben, sowie der für das Thema „Enzyme“ relevante Lehrstoff aus [68, S.66f.] angeführt.

Die Schülerinnen und Schüler

- *kennen den Aufbau von Kohlenwasserstoffen, die wichtigsten funktionellen Gruppen organischer Stoffe und die damit verbundenen Eigenschaften;*
- *kennen den Aufbau von Eiweißen, Kohlenhydraten und Fetten;*
- *können die Bau- und Funktionsweise verschiedener Stoffwechselorgane erklären;*
- *wissen über unterschiedliche Stoffwechselzyklen und Transportwege Bescheid;*
- *können Fragestellungen zum Auf- und Abbau von Nährstoffen bearbeiten;*

- *stellen Zusammenhänge zwischen Struktur, funktionellen Gruppen und Eigenschaften organischer Stoffe her;*
- *können wichtige Gruppen bioaktiver Stoffe nennen und ihre Wirkung erfassen;*
- *erfassen die Einflüsse von Stoffwechselprozessen auf Entwicklung und Gesundheit;*
- *können zu gesellschafts- oder alltagsrelevanten naturwissenschaftlichen Themen aus den Bereichen bioaktive Stoffe bzw. synthetische Stoffe referieren.*

Lehrstoff:

a) Grundlagen der organischen Chemie
b) Aufbau und chemische Eigenschaften der Nährstoffe (Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette)
c) Organsysteme des Stoffwechsels und des Stofftransports
d) Verdauung, Exkretion, Atmung, Herz und Kreislaufsystem, Lymphsystem
e) *Bioaktive Stoffe*

21.3 Schulspezifische Fachschwerpunkte

Ein Vorteil des Unterrichts an HLWs liegt in deren schulspezifischen Fachschwerpunkten. Teilweise sind diese Schwerpunkte so aufgebaut, dass man auch hier chemische Themengebiete, wie Enzyme, in den Unterricht einbringen kann. Einer dieser Schwerpunkte, der Fachschwerpunkt VITAL an der HLW Deutschlandsberg, wird hier genauer betrachtet.

Dieser Schwerpunkt legt seinen Fokus hauptsächlich auf Wellness, Gesundheit und Veranstaltungsmanagement, wobei sich die Schüler/innen unter anderem mit Lebensmitteltechnologien, verschiedenen Ernährungsformen, sowie der Gesundheit und deren Vorsorge auseinandersetzen [69].

Der von der HLW Deutschlandsberg neu konzipierte Lehrplan für den schulspezifischen Gegenstand VITAL bietet jedoch im zweiten und vierten Unterrichtsjahr auch Platz für Naturwissenschaften. Im zweiten Jahr liegt der Schwerpunkt dieses Faches neben dem Veranstaltungsmanagement auch auf dem Durchführen einfacher Experimente im Bereich Ökologie. Im vierten Jahr steht die experimentelle Ernährung im Mittelpunkt. In diesem Bereich wird, neben der Lebensmitteltechnologie und –sensorik, vor allem auf verschiedene einfache Experimente zu Lebensmitteln und Ernährung Wert gelegt. Folglich ist es auch hier – in einer 4. Klasse HLW mit VITAL-Schwerpunkt – möglich, das Thema „Enzyme“ im Unterricht durchzunehmen und anhand verschiedenster Experimente zu veranschaulichen.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass das Thema „Enzyme“ nicht nur in einer AHS mit vielen Chemiewochenstunden und möglicherweise einem naturwissenschaftlichen Zweig, sondern auch sehr vielseitig im Unterricht einer BHS eingesetzt werden kann. Da dieses Thema nicht nur von der chemischen, sondern auch von der biologischen und gesellschaftlichen Seite her betrachtet werden kann, lassen sich besonders viele Verbindungen zum Lehrplan knüpfen. Somit können sich neben dem Fach Chemie auch verschiedene weitere Gegenstände mit Enzymen beschäftigen. Des Weiteren kann das Thema „Enzyme“ sehr praktisch umgesetzt werden, wodurch bei deren Einsatz im Unterricht an allgemeine Bildungsaufträge, wie das Erlernen naturwissenschaftlichen Arbeitens, positiv herangegangen werden kann.

22 Experimente mit Enzymen

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Experimente mit Enzymen dargestellt. Die Versuche werden nach entsprechender Enzymklasse eingeteilt. Außerdem werden hier nur solche Experimente vorgestellt, die problemlos in einer BHS mit häufig kleinem bis gar keinem Chemie-Saal durchzuführen sind. Des Weiteren wird auf die Komplexität der Experimente geachtet und somit nur jene dargestellt, deren Schwierigkeitsgrad sich in Lehrpläne von BHS eingliedern lässt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verwendung von möglichst wenigen Chemikalien und Geräten und deren Ersatz durch Alltagsprodukte. In diesem Zusammenhang wurden im Vorfeld Experimente mit Schülerinnen einer HLW durchgeführt, um einen Einblick in den Chemieunterricht dieses Schultyps zu gewinnen. Es hat sich gezeigt, dass Experimente zu den Enzymklassen der Isomerasen, Transferasen und Ligasen zu komplex für den Einsatz im Unterricht einer BHS sind. Aus diesem Grund wird auf diese drei Enzymklassen im folgenden Abschnitt dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Die in diesem Kapitel verwendeten Gefahrenpiktogramme, sowie die damit korrelierenden H- und P-Sätze werden im Anhang näher beschrieben.

22.1 Experimente mit Hydrolasen

Versuch 1: Hydrolyse von Harnstoff durch Urease [70, S.242][71, S.191f.]

Dauer: 60 Minuten

Materialien: 100 ml Erlenmeyer-Kolben mit Stopfen, 2 Reagenzgläser, Tropfpipette, Universalindikatorpapier, Präzisionswaage, Messzylinder, Sojabohnenmehl

Chemikalien: Harnstoff, 10%ige Salzsäure, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Salzsäure gilt als ätzend! Harnstoff ist gesundheitsschädlich!

Durchführung: 1 g Harnstoff wird in einem Erlenmeyer-Kolben in 20 ml Wasser gelöst. Der pH-Wert wird mittels Universalindikatorpapier ermittelt. 3 ml dieser Lösung werden in einem Reagenzglas mit einigen Tropfen HCl vermischt.

Der Harnstofflösung im Erlenmeyer-Kolben werden 500 mg Sojabohnenmehl hinzugegeben und der Kolben wird mit einem Stopfen verschlossen und ca. 40 Minuten stehen gelassen. Nach den 40 Minuten wird der Erlenmeyer-Kolben geöffnet und der pH-Wert im Inneren ermittelt.

In einem weiteren Reagenzglas werden 3 ml der Lösung im Erlenmeyer-Kolben mit einigen Tropfen HCl vermischt.

Ergebnis: Das Universalindikator-Papier zeigt mit der Harnstofflösung einen neutralen Wert an. Nach der Reaktion zwischen Harnstoff und dem Sojabohnenmehl ist ein alkalischer pH-Wert nachweisbar. Des Weiteren ist Ammoniakgeruch wahrzunehmen. Versetzt man diese Lösung mit HCl, so erkennt man ein Aufschäumen.

Erklärung: Sojabohnen enthalten das Enzym Urease. Dieses ist für die Spaltung von Harnstoff in Ammoniak und Kohlensäure verantwortlich.

$$CH_4N_2O + H_2O \overset{Urease}{\Longleftrightarrow} 2NH_3 + CO_2$$

In der Lösung im Erlenmeyer-Kolben entsteht Ammoniumcarbonat. Dieses wird mittels Salzsäure zu Ammoniumchlorid und Kohlensäure gespalten, welche sofort in Wasser und Kohlenstoffdioxid zerfällt, was am Geruch und am Aufschäumen der Lösung zu erkennen ist.

$$(NH_4)_2CO_3 + 2HCl \rightarrow 2NH_4Cl + H_2O + CO_2\uparrow$$

Abbildung 32: Darstellung des Experiments "Hydrolyse von Harnstoff durch Urease " (a).

Abbildung 33: Darstellung des Experiments "Hydrolyse von Harnstoff durch Urease" (b).

Versuch 2: Nachweis der Urease im Boden [82]

Dauer: 45 Minuten

Materialien: Erlenmeyer-Kolben mit Gummistopfen, Uhrglas, Universalindikatorpapier, Trockenschrank (Heizkörper), Spatel, frische Gartenerde

Chemikalien: Harnstoff

Sicherheitshinweise: Harnstoff ist gesundheitsschädlich!

Durchführung: Frische Gartenerde wird ca. 1 cm hoch in den Erlenmeyer-Kolben gefüllt und mit einer Spatelspitze Harnstoff und etwas Wasser vermischt. Der Erlenmeyer-Kolben wird mit einem Gummistopfen verschlossen. Dabei wird ein angefeuchtetes Universalindikatorpapier zwischengeklemmt. Der Erlenmeyer-Kolben wird für 30 Minuten in den Trockenschrank bei 30°C gestellt.

Ergebnis: Das Universalindikatorpapier färbt sich blau-violett.

Erklärung: Die in der frischen Gartenerde lebenden Mikroorganismen enthalten Urease, welche die hydrolytische Spaltung des Harnstoffs katalysiert.

Es entsteht in weiterer Folge Ammoniak, der durch Blaufärbung des Universalindikatorpapiers nachweisbar ist (siehe Versuch 1: Hydrolyse von Harnstoff durch Urease).

Abbildung 34: Darstellung des Versuches "Nachweis der Urease im Boden".

Versuch 3: Eiweißverdauung mittels Pepsin [72, S.53f.][73, S.105f.]

Dauer: 40 Minuten

Materialien: 5 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, 2 Heizplatten, Eisbad, Thermometer, 30 g Frischfleisch (auch mit Gummibärchen oder Topfen durchführbar!), Messzylinder

Chemikalien: 0,5%ige Salzsäure (HCl), 3%ige Pepsinlösung, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Salzsäure gilt als ätzend!

Durchführung: Zu Beginn des Versuches werden die 5 Reagenzgläser nummeriert. Diese werden wie folgt befüllt:

1. Glas: 1 ml Pepsinlösung + 10 ml Wasser

2. Glas: 10 ml Salzsäure

3. Glas: 10 ml Salzsäure + 1 ml Pepsinlösung

4. Glas: 10 ml Salzsäure + 1 ml Pepsinlösung

5. Glas: 10 ml Salzsäure + 1 ml Pepsinlösung

Die Reagenzgläser 1 und 2 werden als Kontrollproben in den Reagenzglasständer gestellt, während Reagenzglas 3 auf Eis gestellt wird. Das Reagenzglas 4 wird mittels Heizplatte auf 37°C und das Reagenzglas 5 mittels Heizplatte auf ca. 100°C erhitzt.

Sind die gewünschten Temperaturen erreicht, wird in jedes Reagenzglas ein gleich großes Stück Fleisch gegeben. Nach 15 Minuten soll das Ergebnis dokumentiert werden.

Ergebnis: Nur im Reagenzglas, das Salzsäure, Pepsin und Fleisch bei einer Temperatur von ca. 37°C enthält, wird das Stück Fleisch langsam kleiner. Im Reagenzglas, das lediglich Pepsin und Fleisch enthält, zeigt sich keine Veränderung, während das Fleisch im Reagenzglas mit Salzsäure aufquillt.

Erklärung: Pepsin ist ein eiweißverdauendes Enzym des Magens. Es kann erstaunlicherweise bei einem pH-Wert von ca. 1,5 optimal arbeiten, wohingegen die meisten anderen Enzyme längst zerstört wären. Die saure Umgebung des Magens durch den Magensaft (ca. 0,5%ige

HCl) fördert die Eiweißverdauung in dem Sinn, dass Proteine durch den niedrigen pH-Wert bereits teilweise denaturiert (zerstört) werden und somit leichter zugänglich sind für die eiweißverdauenden Enzyme. Bei der Eiweißverdauung werden Proteine meist in der Mitte der Peptidkette zu wasserlöslichen Peptonen aufgespalten. Pepsin alleine führt zu keiner Verdauung des Eiweißes. Salzsäure alleine führt lediglich zu einer starken Denaturierung der Proteine, was sich durch starkes Aufquellen bemerkbar macht.

Pepsin ist, wie alle anderen Enzyme auch, temperaturabhängig. Da sich dieses Enzym im Magen befindet, besitzt es ein Temperaturoptimum bei 37°C. Bei extrem niedrigen, bzw. extrem hohen Temperaturen kann das Enzym nicht sehr gut bis gar nicht arbeiten.

Versuch 4: Stärkeverdauung im Mund – Spezifität der Amylase [12, S.80ff.][73, S.104]

Dauer: 40 Minuten

Materialien: 5 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Bunsenbrenner, Holzklammer, Wasserbad (ca. 35 - 40°C), Becherglas

Chemikalien: Fehlingsche Lösung I und II, destilliertes Wasser, Stärkelösung, Inulinlösung

Sicherheitshinweise: Fehlingsche Lösung I ist gesundheitsschädlich und reizend! Fehlingsche Lösung II kann schwere Verätzungen verursachen!

Durchführung:

Erstellen einer Stärkelösung: Ein Stärkeverpackungschip wird in 50 ml Wasser aufgelöst.

In je ein Reagenzglas werden 5 ml der jeweiligen Substratlösung (Stärke, Inulin) gegeben, und die Reagenzgläser werden entsprechend gekennzeichnet.

In einem Becherglas wird eine große Menge an Speichel gesammelt, die gleichmäßig auf die Reagenzgläser aufgeteilt wird. Die Reagenzgläser werden gut geschüttelt und in das vorbereitete Wasserbad (35 - 40°C) gestellt.

Nach ca. 15 Minuten können die Ansätze nun mit den Fehlingschen Lösungen auf Zucker überprüft werden. Dazu werden die beiden Fehlingschen Lösungen zu gleichen Teilen in einem Reagenzglas vermischt und ein Teil der zu untersuchenden Flüssigkeit zugegeben. Das Gemisch wird vorsichtig am Bunsenbrenner mit Hilfe einer Holzklammer erhitzt.

Ergebnis: Der Inhalt des Reagenzglases, das Stärkelösung und Speichel enthält, reagiert positiv auf den Zuckernachweis mittels Fehlingscher Lösungen. Die Probe, die aus Inulinlösung und Speichel besteht, reagiert negativ auf den Zuckernachweis.

Erklärung: Pflanzliche Stärke kann durch Amylasen hydrolytisch abgebaut werden. Eine sehr aktive Amylase, die Stärkemoleküle (bestehend aus Amylose und Amylopektin) durch Trennung von 1,4-α-Glykosidbindungen bis zum Disaccharid Maltose abbaut, ist unter anderem im Mundspeichel enthalten.

Zuckernachweis:

Die Fehlingsche Lösung I besteht aus einer wässrigen Lösung von Kupfer(II)-sulfat. In der Fehlingschen Lösung II sind Kaliumnatriumtartrat und Natronlauge enthalten. Führt man diese Lösungen zusammen, ergibt es einen tiefblauen Komplex. Weist man Zucker nach, entsteht ein roter Niederschlag. Dieser besteht größtenteils aus Kupfer(I)-oxid (Cu_2O), das beim Erwärmen der Fehlingschen Lösung mit dem Einfachzucker in einer Redoxreaktion entsteht.

Es wurde sowohl mit Stärke, als auch mit Inulin gearbeitet. Stärke ist ein Polysaccharid, das als Speicherstoff dient und aus Glucoseeinheiten aufgebaut ist.

Auch Inulin ist eine solche Speichersubstanz, besteht aber Großteils aus Fructoseeinheiten und nur im kleinsten Anteil aus Glucose. Da Amylase, wie die meisten anderen Enzyme auch, eine Substratspezifität aufweist, kann sie nur Stärkemoleküle zerlegen, nicht jedoch die strukturell sehr ähnlichen Inulinmoleküle. Dies macht sich dadurch bemerkbar, dass sich in der Stärkelösung nach Zugabe von Speichel Zucker nachweisen lässt, während der Test der Inulinlösung auf Zucker negativ ausfällt.

Des Weiteren könnte man die Amylase-Aktivität auch mithilfe der Lugolschen-Lösung nachweisen. Diese Lösung färbt stärkehaltige Substanzen aufgrund der Bildung eines Iod-Stärke-Komplexes blau-violett. Diese Färbung verschwindet mit dem Abbau der Stärke durch Amylase.

Abbildung 35: Darstellung eines negativen Glucose-Nachweises.

Abbildung 36: Darstellung eines positiven Glucose-Nachweises.

Versuch 5: pH-Abhängigkeit des Stärkeabbaus durch die Mundspeichel-Amylase [12, S.80ff.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: 8 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, 25 ml Messzylinder, 2 Messpipetten (5 ml), Peleusball, Pasteurpipette, Trinkglas, Stoppuhr, Mundspeichel (Amylase)

Chemikalien: 0,1%ige Amyloselösung (0,1 g lösliche Stärke in 100 ml destilliertem Wasser aufkochen) 0,25%ige Iodkaliumiodidlösung, 0,5 mol/l Hydrogenphosphat, 0,25 mol/l Zitronensäure

Sicherheitshinweise: Die Lugolsche Lösung ist gesundheitsschädlich, umweltschädlich und reizend! Zitronensäure ist ätzend! Natriumhydrogenphosphat ist reizend!

Durchführung: Zu Beginn werden vier Pufferlösungen aus Natriumhydrogencarbonat und Zitronensäure zu je 20 ml mit den pH-Werten 5, 6, 7 und 8 erstellt.

Gewinnung der Mundspeichelamylase: Der Mund wird eine Minute lang mit destilliertem Wasser gespült, welches anschließend in ein Trinkglas gespuckt wird. Dort wird mit destilliertem Wasser auf ca. 50 ml aufgefüllt.

Nun werden in 4 Reagenzgläser jeweils 5 ml Amyloselösung pipettiert.

Um die Reaktion zu starten, wird jeweils 1 ml des verdünnten Mundspeichels in die vorbereiteten Reagenzgläser mit den erstellten Pufferlösungen pipettiert und jeweils ein Reagenzglas mit 5 ml Amyloselösung zugegeben. Die Stoppuhr wird sofort betätigt.

Nach 5 Minuten wird die Reaktion mittels zehn Tropfen Lugolscher-Lösung abgebrochen.

Ergebnis: Bei pH 5 und pH 8 sind die Lösungen blau gefärbt, während bei pH 6 eine hellrosa Färbung auftritt und es bei pH 7 zu einer Entfärbung (gelbe Färbung aufgrund der Eigenfarbe des Iods) kommt.

Erklärung: Die Amylose kann Amylase aufspalten (siehe Versuch 4). Amylose besitzt neben einer Temperaturabhängigkeit und einer Substratspezifität auch eine gewisse pH-Abhängigkeit. Diese pH-Abhängigkeit kommt aufgrund reversibel protonierbarer Gruppen im aktiven Zentrum des Enzyms zustande. Bei der Änderung des pH-Wertes kommt es zu einer Konformationsänderung und somit zu einer Änderung der katalytischen Aktivität.

Wie der Versuch zeigt, funktioniert der Abbau der Stärke bei den pH-Werten 6 und 7 am besten, wohingegen bei pH-Werten von 5 und 8 noch eine Menge an Stärke nachzuweisen ist (blaue Färbung bei Testung mit Lugolscher-Lösung). Tatsächlich liegt das pH-Optimum der Amylase bei einem pH-Wert von 6,7.

Abbildung 37: Darstellung eines positiven Stärke-Nachweises mittels Lugolscher Lösung.

Versuch 6: Nachweis von Lipase in Verdauungspräparaten am Beispiel des Pankreon [4, S.125f.][9, S.258f.]

Dauer: 20 Minuten

Materialien: 4 Reagenzgläser, Wasserbäder (Eisbad, 37°C, 90°C), Spatel, Stoppuhr, Kondensmilch, Verdauungspräparat Pankreon (Pulver oder Tablette)

Chemikalien: NaOH-Lösung, Phenolphthalein-Lösung

Sicherheitshinweise: Phenolphthalein ist gesundheitsschädlich! Natriumhydroxid ist ätzend!

Durchführung: Die vier Reagenzgläser werden bis zur Hälfte mit Milch gefüllt. Es werden einige Tropfen Phenolphthalein-Lösung zugegeben. Nun wird so lange Natriumhydroxid-Lösung zugegeben, bis eine konstante Rotfärbung entsteht.

Es wird in drei der Reagenzgläser eine Spatelspitze Pankreon-Pulver zugegeben und gut durchmischt. Ein Reagenzglas wird in das Eisbad, eines in das Wasserbad mit 37°C und eines in das Wasserbad mit 90°C gestellt. Das Reagenzglas ohne Pankreon wird in das Wasserbad mit 37°C gestellt. Es wird mittels Stoppuhr ermittelt, wann eine Entfärbung der Lösungen eintritt.

Ergebnis: Nach wenigen Minuten verschwindet die Färbung in den Reagenzgläsern, die Pankreon enthalten. Der Inhalt des Reagenzglases auf Eis entfärbt sich am langsamsten, während sich der Inhalt des Reagenzglases im Wasserbad mit 37°C am schnellsten entfärbt. Der Inhalt des Reagenzglases ohne Pankreon zeigt keine Veränderung.

Erklärung: Pankreon ist ein Verdauungspräparat, das in einem Gramm 850 mg Pankreatin enthält. Pankreatin ist ein enzymatisch wirksames Gemisch aus Lipasen, Amylasen und Proteasen und kann somit Fett, Stärke und Proteine spalten.

Phenolphthalein ist ein pH-Indikator, der im neutralen bis leicht sauren Bereich farblos ist und im alkalischen Bereich eine rosa bis rote Färbung aufweist. Aufgrund der Zugabe von NaOH befindet sich der pH-Wert der zu untersuchenden Lösungen im alkalischen Bereich. Nach Zugabe von Pankreon entfärbt sich die Lösung.

Die im Pankreon enthaltenen Lipasen spalten die in der Milch enthaltenen Fette in deren Fettsäuren und Glycerin. Erstere führen zu einem niedrigeren pH-Wert der Lösung und somit zu deren Entfärbung.

Lipasen sind, wie andere Enzyme auch, temperaturabhängig. Da sich das Pankreatin in der Bauchspeicheldrüse von Säugern befindet, haben diese darin enthaltenen Enzyme ein Temperaturoptimum von rund 37°C. Bei niedrigeren, bzw. bei höheren Temperaturen können sie nicht effektiv arbeiten.

Versuch 7: Nachweis von Amylasen in Waschmitteln [74, S.120f.][75, S.191]

Dauer: 20 Minuten

Materialien: 2 Deckel von Marmeladegläsern, Topf, Heizplatte, Esslöffel, Messzylinder, Puddingpulver (Inhaltsstoffe: Stärke, stark entöltes Kakaopulver, Aroma), Vollwaschmittel mit Amylase, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Große Mengen Waschmittel können eine reizende Wirkung auf die Haut haben!

Durchführung: Ein Viertel einer Packung Puddingpulver wird in 3 Esslöffel destilliertem Wasser angerührt und in 125 ml kochendem Wasser unter Rühren aufgekocht.

Anschließend wird der heiße Pudding in die beiden Marmeladeglas-Deckel gefüllt. Die Deckel werden leicht schräg gestellt, sodass nicht der gesamte Deckel mit Pudding bedeckt ist.

Ein Deckel wird ohne Zusatz in den Kühlschrank gestellt. Der zweite Deckel wird mit einigen Tropfen Waschmittel versehen, gut umgerührt und daraufhin in den Kühlschrank gestellt. Die beiden Deckel werden nach 10 Minuten miteinander verglichen.

Ergebnis: Der Inhalt von Deckel 1, der ohne Zusatz in den Kühlschrank gestellt wird, erhärtet. Im Gegensatz dazu verändert sich der Inhalt von Deckel 2, der mit Waschmittel versehen worden ist, nicht und bleibt flüssig.

Erklärung: Die im Puddingpulver enthaltene Stärke ist ein Polysaccharid, das aus Glucoseeinheiten aufgebaut ist. Stärke kann durch das Enzym Amylase in einfache Glucoseeinheiten gespalten werden. Aus dieser Spaltung resultiert die Verflüssigung des Puddings, da keine Stärke zur Unterstützung zum Erstarren des Puddings mehr vorhanden ist.

In Vollwaschmitteln ist Amylase enthalten, um stärkehaltige Verschmutzungen reinigen zu können. Niedermolekulare Verbindungen können viel leichter mit Wasser abgeführt werden, als die hochmolekulare Stärke. Vermengt man ein solches Waschmittel mit Puddingpulver, so wird mittels der im Waschmittel enthaltenen Amylase die Stärke im Puddingpulver gespalten, und der Pudding kann nicht mehr erstarren.

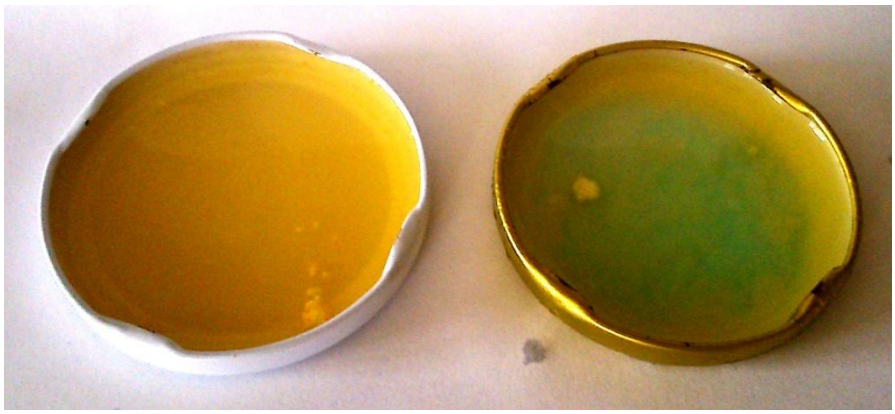


Abbildung 38: Darstellung des Versuches "Nachweis von Amylasen in Waschmitteln". Im linken Deckel befindet sich der erstarre Pudding. Im rechten Deckel befindet sich der aufgrund der Amylase noch dickflüssige Pudding.

Versuch 8: Nachweis von Proteasen im Waschmittel [74, S.123][75, S.189f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: 4 Bechergläser, Eisbad, Spatel, Heizplatte, Thermometer, Speisegelatine, Speisefarbe, Waschmittel mit Protease, Wollwaschmittel ohne Protease, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Große Mengen Waschmittel können eine reizende Wirkung auf die Haut haben!

Durchführung: 5 g Speisegelatine werden in 100 ml Wasser bei 40°C in einem Becherglas gelöst und auf vier Bechergläser verteilt. Dazu wird jeweils eine Spatelspitze Speisefarbe gegeben. Das erste Glas wird ohne jeglichen weiteren Zusatz in einem Eisbad gekühlt.

Nach dem Erstarren der gefärbten Gelatine-Lösungen der drei weiteren Bechergläser werden zwei Gläser mit je einer Spatelspitze Vollwaschmittel befüllt und zu einem Glas wird eine Spatelspitze Wollwaschmittel gegeben.

Anschließend werden sowohl ein Gelatine-Gemisch mit Vollwaschmittel als auch ein Gelatine-Gemisch mit Wollwaschmittel im Wasserbad erwärmt, bis sich die Gelatine wieder verflüssigt.

Das verbleibende Gelatine-Gemisch mit Vollwaschmittel wird aufgekocht.

Im Anschluss werden alle vier Bechergläser im Eisbad abgekühlt und untereinander verglichen.

Ergebnis: Die Gelatine im Becherglas ohne weiteren Zusatz erstarrt.

Die Gelatine, die im Becherglas mit dem Vollwaschmittel aufgekocht wird, erstarrt ebenfalls. Das gleiche passiert mit der Gelatine, die im Becherglas mit dem Wollwaschmittel erhitzt wird.

Nur die Gelatine, die im Becherglas mit dem Vollwaschmittel erwärmt wird, behält ihre zähflüssige Form bei, und erstarrt nicht.

Erklärung: Gelatine ist ein Polypeptid tierischer Herkunft. Es besteht aus Kollagen, welches aus dem Bindegewebe verschiedener Tierarten gewonnen wird und aus 1014 Aminosäuren besteht.

Dieses Polypeptid wird unter Einwirkung von Proteinasen in Peptide niedriger Molekülmasse und in Aminosäuren gespalten. Erkennbar ist dieser Vorgang daran, dass viskose Gelatinelösung nicht ausgelieren kann.

Erhitzt man Gelatine auf bis zu 60°C in Wasser, so löst es sich auf und härtet beim Erkälten wieder zu einer klaren Gallerte aus. Bereits im Mund verflüssigt sich diese Gallerte wieder und im Körper wird Gelatine mittels proteolytischer Enzyme abgebaut.

Auch Proeinasen sind temperaturabhängig und denaturieren bei zu großer Hitze. Dies spiegelt die aufgekochte Gelatinelösung mit Vollwaschmittel wider, die trotz proteinasenhaltigen Waschmittels erstarren kann, da die Wirkung der Proteinasen nicht mehr gegeben ist.

Da Proteinasen Proteine abbauen und somit Naturfasern angreifen, sind diese in keinem Wollwaschmittel enthalten. Folglich kann mit Wollwaschmittel versetzte Gelatine völlig normal aushärten.

Variante 2: Für dieses Experiment können anstelle von Gelatine Gummibärchen verwendet werden. Diese bestehen zum Großteil aus Gelatine und können auch ohne Aufkochen für diesen Versuch verwendet werden. Versetzt man Gummibärchen mit den entsprechenden Waschmitteln, so wird derselbe Effekt, wie bei diesem Versuch beschrieben, erzielt.

Versuch 9: Nachweis von Cellulasen im Waschmittel [74, S.121f.][75, S.190]

Dauer: 10 Minuten

Materialien: 2 leere Marmeladegläser, rote Zwiebelschalen, destilliertes Wasser, Waschmittel mit Cellulase (Dr. Beckmanns Fleckenteufel)

Sicherheitshinweise: Große Mengen Waschmittel können eine reizende Wirkung auf die Haut haben!

Durchführung: Die beiden Gläser werden mit Zwiebelschalen und ca. 10 ml destilliertem Wasser gefüllt. Glas 1 wird als Blindprobe mit keinem Zusatz versehen und zur Seite gestellt. Glas 2 wird mit cellulasehaltigem Waschmittel versehen.

Die beiden Gläser werden nach ca. 10 Minuten miteinander verglichen.

Ergebnis: Glas 1 zeigt keine Veränderung. Das Wasser in Glas 2 verfärbt sich. Die Zwiebelschale, welche mit Dr. Beckmanns Fleckenteufel versehen wird, entfärbt sich fast vollständig.

Erklärung: Die rote Färbung der Zwiebelschalen kommt aufgrund von Farbstoffeinlagerungen in den Vakuolen der Zellen zustande. Jede Zelle ist von einer Zellmembran, pflanzliche Zellen zusätzlich noch von einer Zellwand, umgeben. Diese Zellwand ist unter anderem aus Zellulose aufgebaut.

Cellulasen ist es möglich diese Zellulose abzubauen, wodurch der Farbstoff aus der Vakuole ausdringen kann und das umgebende Wasser färbt.

In Waschmitteln werden Cellulasen dazu eingesetzt, Baumwollfasern zu glätten und cellulosehaltige Flecken zu spalten, um diese leichter auswaschen zu können.

Abbildung 39: Darstellung der durch Cellulase verfärbten Flüssigkeit.

Versuch 10: Nachweis von Lipasen im Waschmittel [74, S.122][75, S.191f.]

Dauer: 10 Minuten

Materialien: zwei Schnappdeckelgläser, Wasserbad mit ca. 50°C, Olivenöl, lipasehaltiges Waschmittel

Chemikalien: grüne Kerzenwachsfarbe, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Große Mengen Waschmittel können eine reizende Wirkung auf die Haut haben!

Durchführung: Olivenöl wird mittels lipophiler Kerzenwachsfarbe gefärbt. Anschließend werden die zwei Schnappdeckelgläser ca. zur Hälfte mit heißem Wasser gefüllt und in jedes Glas so viel des gefärbten Olivenöls gegeben, dass sich ein Ölfilm über dem Wasser bildet.

Ein Glas wird ohne weitere Zusätze in das Wasserbad gestellt. Bevor das zweite Schnappdeckelglas in das Wasserbad gestellt wird, wird lipasehaltiges Waschmittel zugegeben.

Nach ca. 5 Minuten wird der Inhalt der beiden Gläser miteinander verglichen.

Ergebnis: Glas 1, welches ohne Zusätze in das Wasserbad gestellt wird, zeigt keine Veränderung. Der Ölfilm ist weiterhin auf dem Wasser zu sehen.

In Glas 2, welches zusätzlich mit Waschmittel versehen wird, ist der Ölfilm nicht mehr sichtbar. Es entsteht eine grün-blaue Trübung.

Erklärung: Lipasen können Fette in freie Fettsäuren spalten. Diese Lipasen wirken an der Grenzschicht Öl/Wasser und katalysieren die hydrolytische Spaltung des Öls in Fettsäuren und Glycerin.

Glycerin ist wasserlöslich und die freien Fettsäuren verteilen sich fein im Wasser, wodurch das Öl nicht mehr als Film sichtbar ist.

Außerdem sind in einem Waschmittel neben Lipasen Tenside enthalten, die für einen ähnlichen Effekt sorgen.

Abbildung 40: Darstellung von Öl in Wasser ohne Lipasenzusatz.

Abbildung 41: Darstellung von Öl in Wasser mit Lipasenzusatz.

Versuch 11: Nachweis der enzymatischen Aktivität der Fangorgane carnivorer Pflanzen [76, S.77ff.]

Dauer: 90 Minuten

Materialien: entwickelte Endabschnitte von Diafilmen, Klebestreifen, Plastikklammern, Objektträger, Overheadfolie, lebende carnivore Pflanze (Venusfliegenfalle, Kap-Sonnentau…), Mikroskop, Topf, Heizplatte, Becherglas

Chemikalien: Lugolsche Lösung, lösliche Stärke, Agar, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Die Lugolsche Lösung ist gesundheitsschädlich, umweltschädlich und reizend!

Durchführung:

Proteasen-Nachweis:

Zwei Diafilmstreifen werden jeweils mit der Schichtseite auf beide Seiten eines Blattes einer carnivoren Pflanze gelegt und nicht zu stark befestigt. Nach ca. 45 Minuten werden die Filmstreifen unter dem Mikroskop untersucht. Die zu untersuchenden Filmstreifen werden zwischen Objektträger gepresst, die mittels Klebestreifen zusammengehalten werden.

Amylasen-Nachweis:

Für den Nachweis von Amylasen wird eine eigene Folie erstellt. Dazu werden 1 g lösliche Stärke und 1 g Agar in 50 ml Wasser gekocht und Stücke einer Overheadfolie eingetaucht. Diese werden daraufhin getrocknet und stellen anschließend eine homogene Schicht dar. Diese Folien werden in Lugolsche Lösung getaucht und auf beiden Seiten eines Blattes einer carnivoren Pflanze befestigt. Nach ca. 45 Minuten werden diese Folien untersucht.

Ergebnis:

Proteasen-Nachweis: Mithilfe des Mikroskops wird sichtbar, wo die Gelatineschicht des Filmstreifens angegriffen worden ist. Die sezernierenden Pflanzendrüsen sind zu erkennen.

Amylasen-Nachweis: Auf den durch die Lugolsche Lösung blau-violett gefärbten Folien sind helle Flecken zu erkennen.

Erklärung: Carnivore Pflanzen erhöhen ihre Versorgung mit reduzierenden Stickstoffverbindungen, indem sie die Biomasse ihrer kleinen Beutetiere nützen. Dazu besitzen sie sogenannte Exoenzyme, die sie als eine Art Verdauungssekret aus ihren Pflanzendrüsen sezernieren, um unter anderem Proteine und Stärke anzugreifen, abzubauen und die gelösten Nährstoffe für sich zu nutzen.

Versuch 12: Herstellung von Kunsthonig [75, S.25f.][77, S.15]

Dauer: 50 Minuten

Materialien: Reagenzglas, Porzellanschale, Bunsenbrenner, Dreifuß, Glasstab

Chemikalien: Invertase oder Citronensäure (10%ig), Saccharose

Sicherheitshinweise: Die Citronensäure ist ätzend!

Durchführung: Die Saccharose wird ca. 2 cm hoch in das Reagenzglas gefüllt und mit doppeltem Volumen an Wasser gelöst. Dieser Lösung werden einige Tropfen Citronensäure oder Invertase zugegeben und sie wird in eine Porzellanschale überführt. Das Gemisch wird in der Porzellanschale ca. 40 Minuten lang erhitzt.

Ergebnis: Die einst farblose Flüssigkeit wird mit zunehmender Zeit gelblich bist braun und entwickelt sich zu einer viskosen Masse.

Erklärung: Sowohl die Citronensäure, als auch das Enzym Invertase verursachen als Katalysator, bzw. als Biokatalysator eine Hydrolyse der Saccharose in Glucose und Fructose. Dieses bei dieser Hydrolyse entstehende Gemisch wird als Invertzucker bezeichnet. Dieser Invertzucker wird neben der Herstellung von Kunsthonig auch zur Herstellung von Marmeladen, Bonbons oder Likören verwendet [73, S.47].

$$C_{12}H_{22}O_{11}(Saccharose) + H_2O \xrightarrow{Invertase\ oder\ Säure} C_6H_{12}O_6\ (Glucose) + C_6H_{12}O_6(Fructose)$$

In der Lebensmitteltechnologie wird Kunsthonig, bzw. Invertzuckercreme meist säurekatalytisch und nur selten enzymatisch mittels Invertase hergestellt.

Versuch 13: Nachweis der Amylase im Honig [75, S.26f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: Topf, 2 Marmeladeglas-Deckel, Löffel, Puddingpulver, Honig, Kunsthonig (siehe Versuch 12)

Durchführung: Ein Viertel einer Packung Puddingpulver wird in 3 Esslöffel Wasser angerührt und in 125 ml kochendem Wasser unter Rühren aufgekocht.

Anschließend wird der heiße Pudding in die beiden Marmeladeglas-Deckel gefüllt. In einen Deckel wird ein kleiner Löffel Honig gegeben, der andere wird mit einem kleinen Löffel Kunsthonig versehen. Beide Deckel werden kalt gestellt und deren Inhalt nach wenigen Minuten miteinander verglichen.

Ergebnis: Der Pudding, dem Kunsthonig zugesetzt wird, erstarrt vollständig. Der Pudding, dem Honig zugegeben wird, behält seine zähflüssige Form bei.

Erklärung: Der Kunsthonig wird durch eine enzymkatalysierte bzw. säurekatalysierte Hydrolyse aus Saccharose erstellt. In dieser Invertzuckercreme ist lediglich das Enzym Invertase, jedoch keine weiteren Biokatalysatoren, enthalten. Natürlicher Honig allerdings enthält neben der Invertase, die auch hier für die Hydrolyse des Zuckers verantwortlich ist, auch Amylasen. Diese Amylasen werden dem Honig von der Biene zugesetzt.

Fügt man nun einem Pudding, der größtenteils aus Stärke besteht, Honig zu, so wird diese Stärke von der im Honig enthaltenen Amylase gespalten, und der Pudding kann folglich nicht mehr erstarren. Da Kunsthonig keine Amylasen enthält, kann Pudding bei dessen Zugabe sehr wohl erstarren.

Abbildung 42: Erhärteter Pudding ohne Honig (links) und zähflüssiger Pudding mit Honig (rechts).

Versuch 14: Einfluss der Protease Bromelain auf Gummibärchen [78, S.22, S.25][79]

Dauer: 1 Stunde

Materialien: 2 Erlenmeyer-Kolben (250 ml), Trichter, Filterpapier, Messzylinder, Universalindikatorpapier, 2 Bechergläser (100 ml), Waage, frisch gepresster Ananassaft, 2 rote Gummibärchen

Chemikalien: Aceton, Essigsäure (96%ig), destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Aceton ist leicht entzündlich und reizend! Essigsäure ist ätzend!

Durchführung:

Isolierung von Fruchtbromelain:

100 ml frisch gepresster Ananassaft werden in einem Erlenmeyer-Kolben mit 100 ml Aceton versetzt. Der dabei entstehende Niederschlag wird in den zweiten Erlenmeyer-Kolben abfiltriert.

10 ml Essigsäure werden in einem Becherglas so lange mit destilliertem Wasser versetzt, bis der pH-Wert der Lösung ca. 5 ist. Die Hälfte dieser Lösung wird in ein zweites Becherglas gefüllt. Eines dieser Gläser wird mit 0,20 g Fruchtbromelain versehen. Das zweite Becherglas dient als Kontrollprobe.

In beide Bechergläser wird jeweils ein Gummibärchen gegeben. Die Ansätze werden mindestens eine Stunde lang bei Raumtemperatur stehen gelassen.

Ergebnis: Der Inhalt des Becherglases, dem Bromelain zugegeben wird, ist rot gefärbt. Das Gummibärchen löst sich entweder zum Teil, oder bereits vollständig auf. Das Gummibärchen im zweiten Becherglas quillt stark auf, ist aber noch vollständig vorhanden. Die Lösung im zweiten Becherglas ist noch farblos.

Erklärung: Alle Pflanzen der Familie der Bromelaceaen besitzen die proteinspaltende Endopeptidase Bromelain. Fruchtbromelain benötigt einen sauren pH-Wert von ca. 4 - 5, um effektiv arbeiten zu können.

Der Hauptbestandteil von Gummibärchen ist Gelatine, ein Protein tierischer Herkunft. Das Enzym Bromelain vermag die Peptidbindungen der Gelatine zu spalten und somit deren Gelierfähigkeit zu zerstören. Dadurch wird das Gummibärchen nach und nach abgebaut. Ein Gummibärchen in wässriger, bzw. essigsaurer Lösung quillt stattdessen lediglich auf, ohne vollständig abgebaut zu werden.

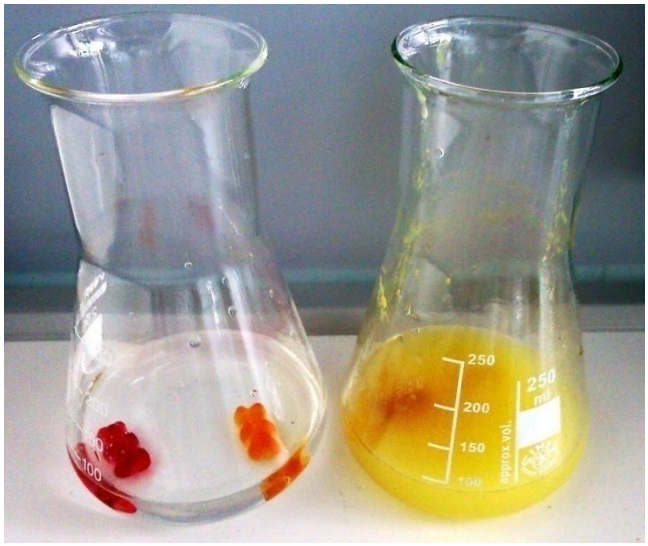


Abbildung 43: Einfluss der Protease Bromelain auf Gummibärchen.

Versuch 15: Nachweis der Chlorophyllase in grünen Bohnen [80, S.20f.][81, S.115]

Dauer: mit Auswertung mehrere Tage

Materialien: Topf, Heizplatte, Gefrierbeutel, grüne Bohnen

Durchführung: Eine Portion grüne Bohnen wird eingefroren. Eine ca. gleich große Portion wird vor dem Einfrieren blanchiert (frisches Gemüse wird kurz in siedendes Wasser getaucht). Die beiden Portionen werden nach ein paar Tagen miteinander verglichen.

Nun wird sowohl das nicht blanchierte, als auch das blanchierte Gemüse gar gekocht und das Ergebnis danach miteinander verglichen.

Ergebnis: Das blanchierte Gemüse besitzt nach dem Einfrieren noch immer eine schöne grüne Farbe, während sich das nicht blanchierte gelblich verfärbt.

Ersteres besitzt auch nach dem Kochen noch eine kräftig grüne Farbe, während Zweiteres nach dem Kochen eine blasse gelbe Färbung aufweist.

Erklärung: Für die grüne Farbe der Bohnen und anderem Gemüse sind die Farbstoffe Chlorophyll a und Chlorophyll b verantwortlich. Diese Farbstoffe befinden sich in den Zellen, getrennt vom Enzym Chlorophyllase. Werden Zellen jedoch beschädigt, wie es beim Gefrieren, Schneiden oder Kochen der Fall ist, so gelangt die Chlorophyllase zu ihren Substraten und kann diese zu den Chlorophylliden a und b abbauen. Dadurch werden die unter normalen Bedingungen vom Chlorophyll verdeckten Carotinoide sichtbar, woraus eine gelbliche Färbung resultiert.

Die Chlorophyllase, sowie andere Enzyme auch, wird beim Blanchieren denaturiert und kann somit Chlorophyll nicht mehr zu Chlorophyllid abbauen. Dadurch bleibt sowohl nach dem Gefrieren, als auch nach dem Kochen, die grüne Farbe des Gemüses erhalten.

Versuch 16: Aktivierung der Pektin-Methylesterase [81, S.114f.]

Dauer: 5 Minuten

Materialien: Heizplatte, kleines Becherglas, Weißkohlblatt

Durchführung: Wasser wird im Becherglas zum Sieden gebracht. Ein Weißkohlblatt wird über der Oberfläche des Wassers im heißen Wasserdampf 3 Minuten lang blanchiert. Danach wird das blanchierte Kohlblatt mit einem unbehandelten Blatt verglichen.

Ergebnis: Das blanchierte Kohlblatt verliert stark an Festigkeit.

Erklärung: Grund für das Verlieren der Festigkeit des Kohlblattes ist das Enzym Pektin-Methylesterase, das bei einer Temperatur von ca. 60°C aktiviert wird. Dieses Enzym katalysiert die hydrolytische Spaltung der Methylester von Pektinen. Pektine sind Polysaccharide, die den Pflanzen als Gerüstsubstanz dienen und für uns Menschen einen Ballaststoff bilden [2].

Versuch 17: Nachweis der Myrosinase in Senf [80, S.88f.]

Dauer: 5 Minuten

Materialien: Löffel, Schneidbrett, schwarze und weiße Senfkörner

Durchführung: Zuerst wird jeweils eine ca. teelöffelgroße Menge an schwarzen und weißen Senfkörnern mithilfe eines Löffels auf einem Schneidbrett zerdrückt. Diese Häufchen werden jeweils mit einem halben Teelöffel Wasser verrührt. Nun wird der Geruch der jeweiligen Senfpaste wahrgenommen.

Dann wird der Geschmack der unterschiedlichen Senfpasten ermittelt. Dazu lässt man die Substanz auf der Zunge zergehen. Dazwischen sollte der Mund mit Wasser ausgespült werden.

Ergebnis: Die schwarzen Senfkörner verursachen einen stechenden Geruch, welchen die weißen Senfkörner nicht aufweisen.

Die schwarze Senfpaste schmeckt stechend scharf. Die weiße Senfpaste schmeckt auch scharf, führt jedoch kein Stechen herbei.

Erklärung: Schwarzer Senf beinhaltet das Senfglycosid Sinigrin. Es ist der Vorbote des stechend scharfen Geruchs und Geschmacks. Werden die Zellen der schwarzen Senfkörner zerstört – wie es beim Zerdrücken mit einem Löffel der Fall ist – so kann das Enzym Myrosinase dieses Sinigrin unter Abspaltung von Glucose in Allylisothiocyanat (Allylsenföl) wandeln. Bei diesem Allylsenföl handelt es sich um eine flüchtige Substanz, die stark schleimhautreizend wirkt. Die Senfpflanze besitzt dieses Enzym, bzw. in weiterer Folge das reizende Allylsenföl, um sich vor Fraßfeinden zu schützen.

Im Gegensatz zu schwarzem Senf beinhaltet weißer Senf das Senfölglycosid Sinalbin. Dieses wird bei Beeinträchtigung der Zelle ebenfalls durch das Enzym Myrosinase unter Abspaltung von Glucose umgewandelt. Allerdings entsteht hier nicht das reizende Allylsenföl, sondern das Sinalbinsenföl (4-Hydroxybenzylisothiocyanat). Dieses wirkt nicht reizend auf Schleimhäute und führt lediglich zu einer Schärfe im Mundraum.

Abbildung 44: Darstellung des Experiments "Nachweis der Myrosinase in Senf".

Versuch 18: Herstellung eines Hüttenkäses mithilfe des Lab-Enzyms [90, S.4ff.]

Dauer: mehrere Stunden

Materialien: Milch, Buttermilch, 1 Labtablette, Salz, Sauerrahm, Topf mit Deckel, Wolldecke, Kochlöffel, Tasse, Wasser

Durchführung: 2 l Milch und 6 EL Buttermilch werden in einem Topf auf 35°C erwärmt. Nun wird der Topf zugedeckt und in eine Wolldecke eingehüllt und 3 – 6 Stunden stehen gelassen.

Danach wird die Milch erneut auf 32°C erhitzt, bevor das Lab zugegeben wird. Dazu wird die Labtablette in einer halben Tasse Wasser zerdrückt und aufgelöst, bevor sie langsam in die Milch eingerührt wird.

Um eine Eindickung der Milch zu gewährleisten, wird der Topf wieder mit dem Deckel zugedeckt, in eine Decke gehüllt und 1 Stunde stehen gelassen. Danach wird mittels Schneidprobe getestet, ob die Masse fertig ist. Dazu wird diese angeschnitten und darauf geachtet, ob der Schnitt stehen bleibt.

Nach der Schnittprobe wird die Masse auf 47°C erhitzt, wobei ständig, langsam umgerührt wird.

Diese Masse wird anschließend in ein Sieb überführt und zum Abtropfen in den Kühlschrank gestellt.

Ergebnis: Nach ein paar Stunden ist der Hüttenkäse fertig und kann nun noch mit Sauerrahm verfeinert werden.

Erklärung: Das eingesetzte Lab-Enzym ist für die Dicklegung der Milch und dem daraus in weiterer Folge entstehenden Käse verantwortlich. Bei diesem Enzym, das aus dem Labmagen von Kälbern isoliert wird, handelt es sich um eine Mischung verschiedener Proteasen (Rennin, Pepsin). Dieses Lab spaltet die Peptidbindungen der Casein-Moleküle, wobei es zur Ausfällung von Caseinkomplexen und in weiterer Folge zur Dicklegung der Milch kommt [91].

22.2 Experimente mit Lyasen

Versuch 1: Nachweis der Alliinase in der Zwiebel [80, S.102f.]

Dauer: 10 Minuten

Materialien: Messer, Schneidbrett, Schibrille, Zwiebeln

Durchführung: Zuerst wird sowohl an einer unverletzten, als auch an einer angeschnittenen Zwiebel gerochen. Nun wird zuerst eine gehäutete Zwiebel in kleine Würfel geschnitten. Anschließend wird eine weitere gehäutete Zwiebel gewaschen und in kleine Würfel geschnitten. Als drittes wird nun eine Schibrille aufgesetzt und abermals eine gehäutete Zwiebel in kleine Würfel geschnitten.

Ergebnis: Eine unverletzte Zwiebel führt im Gegensatz zu einer verletzten Zwiebel nicht zum Tränen der Augen. Das Waschen einer gehäuteten Zwiebel mindert das Tränen nicht, das Tragen einer Schibrille hingegen schon.

Erklärung: Eine Zelle besteht aus mehreren Zellkompartimenten (=Unterteilungen). In einem dieser Kompartimente befindet sich bei der Zwiebel das geruchlose Isoalliin (S-Propenyl-cystein-sulfoxid). In einem weiteren Kompartiment befindet sich das Enzym Alliinase, welches dazu befähigt ist, Isoalliin umzusetzen.

Werden die Zellen verletzt, wie z.B. durch starkes Erhitzen, Anschneiden, Pressen etc., werden die Unterteilungen innerhalb der Zellen zerstört und sowohl das Isoalliin, als auch die Alliinase, können aus den Zellen austreten.

Das Isoalliin wird durch die Alliinase zu Propensulfensäure umgewandelt. Sie ist die Muttersubstanz, bzw. die Vorstufe des tränenreizenden Faktors Thiopropionaldehyd-S-oxid. Diese tränenreizende Substanz ist gasförmig und kann somit nur mittels einer Barriere (z.B. Schibrille) daran gehindert werden, in unser Auge zu gelangen und einen Tränenreiz hervorzurufen.

Abbildung 45: Darstellung des Experimentss "Nachweis der Alliinase in der Zwiebel".

Versuch 2: Carboanhydrase und das Kohlenstoffdioxid-Kohlensäure-Gleichgewicht [9, S.256f.][83]

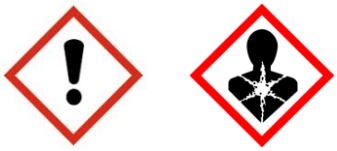
Dauer: 20 Minuten

Materialien: 4 Reagenzgäser, Reagenzglasständer, Einmalpipette, 5 ml Messpipette, 5 ml Standzylinder, Stoppuhr, CO_2-reiches Mineralwasser

Chemikalien: Barbituratpuffer/Indikator (18,42 mg Diethylbarbitursäure in 100 ml destilliertem Wasser lösen und 5 mg Bromthymolblau hinzugeben), Carboanhydrase aus einer Hefesuspension (1 g Hefe in 9 ml destilliertem Wasser auflösen)

Substrat und Pufferlösung sollten zu Versuchsbeginn eine Temperatur von ca. 10°C haben!

Sicherheitshinweise: Diethylbarbitursäure und Bromthymolblau sind gesundheitsschädlich!



Durchführung: Es werden 4 Reagenzgläser vorbereitet. In zwei dieser Reagenzgläser werden 3,5 ml Mineralwasser gegeben. In einem weiteren Reagenzglas werden 5 ml Pufferlösung mit 3 Tropfen Indikatorlösung und 1ml destilliertem Wasser vermischt. In das vierte Reagenzglas werden 5 ml Pufferlösung, 3 Tropfen Indikatorlösung und 1 ml Enzymlösung gegeben.

Nun wird zu Reagenzglas 3 eines der vorbereiteten Reagenzgläser mit Mineralwasser geschüttet und sofort die Stoppuhr gestartet. Es wird die Zeit ermittelt, die es dauert, bis es zu einem Farbumschlag in der Lösung kommt.

Anschließend wird mit dem 4. Reagenzglas gleich verfahren. Es werden 3,5 ml Mineralwasser zugegeben und die Zeit bis zum Farbumschlag gemessen.

Ergebnis: Es kommt sowohl bei Reagenzglas 1, als auch bei Reagenzglas 2 zu einem Farbumschlag, wobei der Farbumschlag in Reagenzglas 2 (Reagenzglas mit Enzymlösung) wesentlich schneller eintritt.

Erklärung: Bromthymolblau ist ein pH-Indikator, der im alkalischen Bereich eine blaue, und im sauren Bereich eine gelbe Färbung aufweist. Zu Beginn des Experimentes sind die Lösungen blau gefärbt. Es kommt jedoch zu einem Farbumschlag ins Gelbe.

Grund dafür ist die Gleichgewichtseinstellung zwischen Kohlenstoffdioxid und Kohlensäure, die laut folgender Reaktionsgleichung abläuft:

$$CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + HCO_3^-$$

Dabei wird bei erhöhtem CO_2-Angebot vermehrt Kohlensäure gebildet und umgekehrt. Bei diesem Versuch ist das CO_2-Angebot erhöht, was zu einer vermehrten Bildung von Kohlensäure führt. Bei dieser Reaktion werden ungeladene, unpolare und lineare CO_2-Moleküle in gewinkelte, polare H_2CO_3-Moleküle, bzw. deren Anionen umgebaut. Diese senkt den pH-Wert der Lösung, und es kommt zu einem Farbumschlag von blau zu gelb.

Diese Reaktion läuft normalerweise sehr träge ab, wie in Reagenzglas 1 dargestellt wird. Katalysiert durch die Carboanhydrase verläuft die Reaktion jedoch um das 10^7-fache schneller, was die Carboanhydrase zu einem der schnellsten Enzyme macht. Dieses Enzym hat auch eine enorme physiologische Bedeutung, da es unter anderem für die CO_2-Regulation des Blutes oder für die Sekretbildung von großer Wichtigkeit ist.

22.3 Experimente mit Oxidoreduktasen

Versuch 1: Wirkungsweise von Enzymen als Katalysatoren [97]

Dauer: 5 Minuten

Materialien: Kartoffel, Kartoffelreibe, 3 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Spatel,

Chemikalien: 3%ige Wasserstoffperoxid-Lösung (H_2O_2), Braunstein (Mangandioxid MnO_2), destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend! Braunstein ist gesundheitsschädlich.

Durchführung: In jedes der drei Reagenzgläser werden 5 ml Wasserstoffperoxid, sowie 10 ml destilliertes Wasser gegeben. Eine ungeschälte Kartoffel wird mit einer Reibe so zerkleinert, dass man einen Kartoffelbrei erhält.

Man fügt in eines der Reagenzgläser etwas Kartoffelbrei zu. In das zweite Reagenzglas wird eine Spatelspitze Braunstein gegeben. Das dritte Reagenzglas dient als Kontrolle. Es enthält nur Wasserstoffperoxid und Wasser.

Ergebnis: In beiden Reagenzgläsern – in der Kontrollprobe nicht – kommt es zu einer recht heftigen, aufschäumenden Reaktion.

Erklärung: Sowohl das unter anderem in der Hefe enthaltene Enzym Katalase, als auch der chemische Katalysator Braunstein, spalten Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff.

Hierbei wird im ersten Reaktionsschritt ein Molekül H_2O_2 reduziert, während die Katalase oxidiert wird. Dabei entsteht Wasser. Der zweite Reaktionsschritt besteht aus der Reduktion eines weiteren Moleküls H_2O_2, sowie der Oxidation von Sauerstoff. Katalase wird wieder reduziert und somit in seine Ausgangsform überführt.

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$$

Abbildung 46: Darstellung der katalytischen Eigenschaften von Katalase.

Abbildung 47: Darstellung der katalytischen Eigenschaften von Braunstein. Es wurde für diesen Versuch eine Zink-Braunstein-Tablette verwendet.

Versuch 2: Abhängigkeit der Katalase – Aktivität von der Substratkonzentration [12, S.76f.]

Dauer: 30 Minuten

Materialien: 6 Messzylinder (100 ml), Messzylinder (50 ml), Messzylinder (10 ml), 5 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Pipette (5 ml), Reibe, Sieb, 2 Bechergläser, Glasstab, Peleusball, Waage

Chemikalien: 8%iges Wasserstoffperoxid, destilliertes Wasser, Phosphat-Puffer pH 7,5 (43 ml 0,1 mol/l K_2HPO_4, 7 ml 0,1 mol/l KH_2PO_4)

Sicherheitshinweise: Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend!

Durchführung: Zuerst wird die Katalase aus Kartoffeln gewonnen. Dazu zerreibt man eine Kartoffel, vermischt den Kartoffelbrei mit 50 ml Phosphatpuffer und rührt gründlich mit einem Glasstab um. Dieses Gemenge wird durch ein Sieb in ein Becherglas filtriert.

In fünf Reagenzgläser werden jeweils 5 ml dieses Filtrats pipettiert.

Nun werden folgende Konzentrationen an Wasserstoffperoxid in 100 ml-Messzylinder erstellt (Angaben in %H_2O_2): 0,5; 1; 2; 4; 8. Dazu wird die benötigte Menge an 8%igem H_2O_2 mit H_2O dest. auf 50 ml aufgefüllt.

Anschließend fügt man diesen Messzylindern jeweils eines der vorbereiteten Reagenzgläser mit 5ml Katalaselösung zu und stoppt die Zeit.

Nach fünf Minuten wird die entstandene Schaummenge in den verschiedenen Messylindern abgelesen.

Ergebnis: Die Schaummenge steigt mit der Konzentration an Substrat, also mit der Konzentration an H_2O_2, an. Jedoch steigt die Schaummenge ab einer H_2O_2 - Konzentration von 2% nur mehr sehr geringfügig an.

Erklärung: Das Enzym Katalase katalysiert die Spaltung von Wasserstoffperoxid (siehe Versuch 1). Die dabei entstehende Sauerstoffmenge ist proportional der Katalase-Aktivität, und die Schaummenge steigt mit gebildetem Sauerstoff an. Somit kann man von der Menge des bei der Katalase-Reaktion gebildeten Schaumes auf deren Aktivität schließen.

Die Reaktionsgeschwindigkeit kann man berechnen, indem man sich die gebildete Schaummenge pro Zeiteinheit (in diesem Experiment 5 Minuten) ansieht.

Trägt man die gebildete Schaummenge gegen die Substratkonzentration auf, so erhält man ein Michaelis-Menten-Diagramm. Aus diesem kann man herauslesen, dass die Geschwindigkeit zuerst mit steigender Substratkonzentration linear steigt.

Ab einer gewissen Konzentration an Substrat allerdings nähert sich die Geschwindigkeit asymptotisch der Maximalgeschwindigkeit und kann durch Erhöhung der Substratkonzentration nicht mehr gesteigert werden. Dies ist der Fall, wenn alle aktiven Zentren des Enzyms besetzt sind und dieses somit voll ausgelastet ist. In diesem Fall würden sich Substratmoleküle bei einer weiteren Zufuhr von Substrat gegenseitig behindern, und somit sogar zu einer Verringerung der Reaktionsgeschwindigkeit führen.

Versuch 3: Lebervergiftung - Blockade des Enzyms Katalase durch Schwermetallionen [84]

Dauer: 40 Minuten

Materialien: 2 Pipetten, 3 Schnappdeckelgläser, Reibschale, Pistill, Leber

Chemikalien: destilliertes Wasser, 10%ige Wasserstoffperoxidlösung, Kupfersulfatlösung, Bleinitratlösung

Sicherheitshinweise: Kupfersulfat ist gesundheitsschädlich und umweltgefährlich! Bleinitrat ist toxisch und umweltgefährlich! Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend!

Durchführung: Ein Stück Leber wird in einer Reibschale zerrieben und auf die drei Schnappdeckelgläser aufgeteilt. In eines der Schnappdeckelgläser wird destilliertes Wasser, in ein weiteres Kupfersulfatlösung und in ein drittes Bleinitratlösung gefüllt.

Nach 30 Minuten werden in jedes Schnappdeckelglas ca. 2 ml Wasserstoffperoxidlösung pipettiert und die Reaktion beobachtet.

Ergebnis: Im Schnappdeckelglas mit destilliertem Wasser und Wasserstoffperoxidlösung tritt heftiges Schäumen auf, während es in den Schnappdeckelgläsern mit schwermetallhaltigen Proben zu keiner, oder nur einer sehr schwachen Reaktion kommt.

Erklärung: Um den Organismus vor Wasserstoffperoxid zu schützen, besitzt unter anderem die Leber große Mengen des Enzyms Katalase, welches dazu befähigt ist, diesen in Wasser und Sauerstoff zu spalten (siehe Versuch 1). Schwermetall-Ionen sind Beispiele für Inhibitoren, die Enzyme aufgrund einer Bindung an deren aktives Zentrum irreversibel hemmen. Bei einer Hemmung des Enzyms Katalase kann das Wasserstoffperoxid nicht mehr gespalten werden, was zu einer Vergiftung der Leber und in weiterer Folge zum Tod führt.

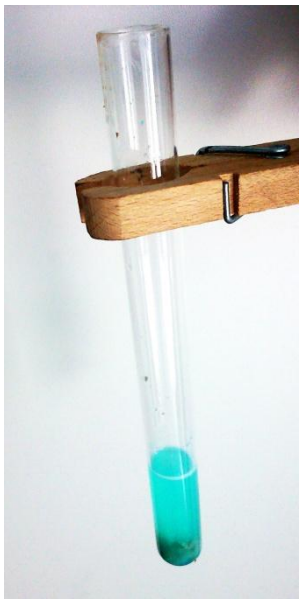


Abbildung 48: Darstellung der katalytischen Eigenschaft der Katalase in Leber.

Abbildung 49: Darstellung der Hemmung von Katalse durch Schwermetalle.

Versuch 4: Hohes Fieber – Denaturierung des Enzyms Katalase durch Hitze [84]

Dauer: 10 Minuten

Materialien: Bunsenbrenner, 2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Reagenzglaszange, Pipette, Becherglas, Leber

Chemikalien: 10%ige Wasserstoffperoxidlösung, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend!

Durchführung: In beide Reagenzgläser wird ein Stück Leber gegeben und dieses mit destilliertem Wasser bedeckt. Eines dieser Reagenzgläser wird mittels Bunsenbrenner stark erhitzt.

Nun werden beide Reagenzgläser mit Wasserstoffperoxidlösung versetzt.

Ergebnis: Im nicht erhitzten Reagenzglas kommt es zu einer starken Schaumbildung, die im erhitzen Reagenzglas nicht zu sehen ist.

Erklärung: Das Enzym Katalase, welches in der Leber für die Spaltung des Wasserstoffperoxids verantwortlich ist (siehe Versuch 1), wird, wie die meisten anderen Enzyme auch, durch starke Hitze denaturiert. Somit ist es nicht mehr fähig, Wasserstoffperoxid zu spalten. Folglich tritt keine Schaumbildung auf, die aufgrund der Sauerstoffbildung bei der Spaltung des Wasserstoffperoxids entsteht.

Zu einer solchen Denaturierung von Enzymen kann es auch bei sehr hohem Fieber kommen. Diese kann in weiterer Folge sogar zum Tod führen.

Abbildung 50: Darstellung der Hemmung der Katalase durch Hitze.

Versuch 5: Bestimmung der Wechselzahl am Beispiel der Katalase [9, S.252ff.]

Dauer: 20 Minuten

Materialien: Saugflasche, Kolbenprober, Stativmaterial, Injektionsspritze (5 oder 10 ml), Gummistopfen für Saugflasche, Stoppuhr, Pilz-Katalase (0,1%ig)

Chemikalien: 1%ige Wasserstoffperoxidlösung,

Sicherheitshinweise: Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend!

Durchführung: Der in nachstehender Abbildung dargestellte Versuchsaufbau wird nachgestellt.

Mithilfe der Injektionsspritze wird 1 ml an 0,1%iger Pilz-Katalase in die Saugflasche mit Wasserstoffperoxid injiziert. Es wird gut umgeschüttelt. Nach 3 Minuten wird mittels Kolbenprober die Menge an entstandenem Sauerstoff abgelesen und das Ergebnis in O_2/min festgehalten.

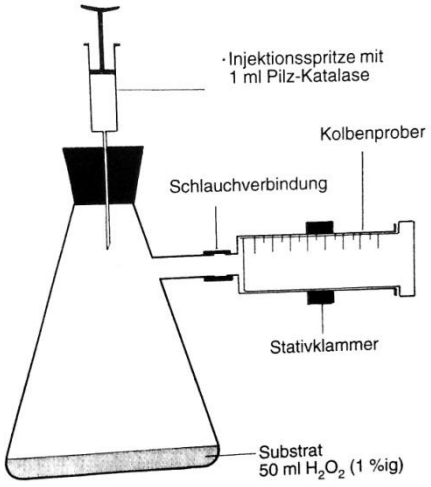


Abbildung 51: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wechselzahl [9, S. 253].

Ergebnis: Aufgrund der Spaltung von Wasserstoffperoxid durch Katalase entsteht Sauerstoff (siehe Versuch 1), dessen genaue Menge mittels Kolbenprober ermittelt wird.

Erklärung: Mithilfe der entstandenen Menge an Sauerstoff pro Zeiteinheit, also in diesem Fall O_2/min, kann die Wechselzahl des Enzyms ermittelt werden. Diese gibt die Anzahl der umgesetzten Substratmoleküle pro Zeiteinheit an.

Um die Wechselzahl eines Enzyms ermitteln zu können, müssen sowohl dessen molare Masse, als auch die Menge an eingesetztem Substrat bekannt sein.

Da bei der Reaktion von Wasserstoffperoxid zu Wasser und Sauerstoff Edukte und Produkte in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen, kann man zur Berechnung der Wechselzahl der Katalase anstatt der Menge an Substrat, auch die Menge an Produkt (Sauerstoff) verwenden.

Berechnung:

M (Katalase): ca. 250000 g/mol

Eingesetzte Enzymmenge: 1 ml 0,01%iger Enzymlösung (0,0001 g Enzym)

Anhand einer einfachen Schlussrechnung kann nun die Menge an Sauerstoff ermittelt werden, die von 25.0000 g Enzym umgesetzt werden kann.

Nun wird die Avogadro-Konstante ($6{,}022*10^{23}$) miteinbezogen, wodurch man den erzeugten Sauerstoff pro Minute eines Moleküls Katalase errechnen kann und somit die Wechselzahl des Enzyms ermittelt.

Versuch 6: Wirkungsweise von Glucoseteststäbchen (GOD-Test) [9, S.251f.][85, S.75f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: Reagenzgläser, Reagenzglasständer, 2 ml und 5 ml Messpipette, Glucoseteststäbchen

Chemikalien: verschiedene 0,1 M Zuckerlösungen

Durchführung: Die Zuckerlösungen werden in jeweils ein Reagenzglas gefüllt.

Nun taucht man jeweils ein Glucoseteststäbchen in eine Zuckerlösung und liest die Farbreaktion ab.

Ergebnis: Die Teststäbchen verfärben sich je nach Konzentration der zu untersuchenden Glucoselösungen unterschiedlich stark.

Erklärung: Mithilfe der Glucoseteststäbchen kann die Konzentration von Glucose in Flüssigkeiten (in der Praxis meist in Harn) ermittelt werden, da sich die Stäbchen je nach Konzentration an Glucose in der zu untersuchenden Lösung verfärbt. Diese Färbung kann mittels Farbskala einer Konzentration an Glucose zugeteilt werden.

Gründe für diese Verfärbung der Teststäbchen sind die beiden Enzyme Glucose-Oxidase und Peroxidase. Diese Enzyme befinden sich gefriergetrocknet auf den Glucoseteststäbchen. Bei der Reaktion mit Glucose baut Glucose-Oxidase diese in Gluconolacton um, während aus Sauerstoff Wasserstoffperoxid gebildet wird.

Aus dem Gluconolacton entsteht unter Reaktion mit Wasser die Gluconsäure. Die Peroxidase wandelt anschließend das Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff um. Dabei wird der sich am Teststäbchen befindende Indikator Tolidin oxidiert und ändert somit seine Farbe ins Bläuliche. Diese Reaktion wird in der nachstehenden Grafik dargestellt.

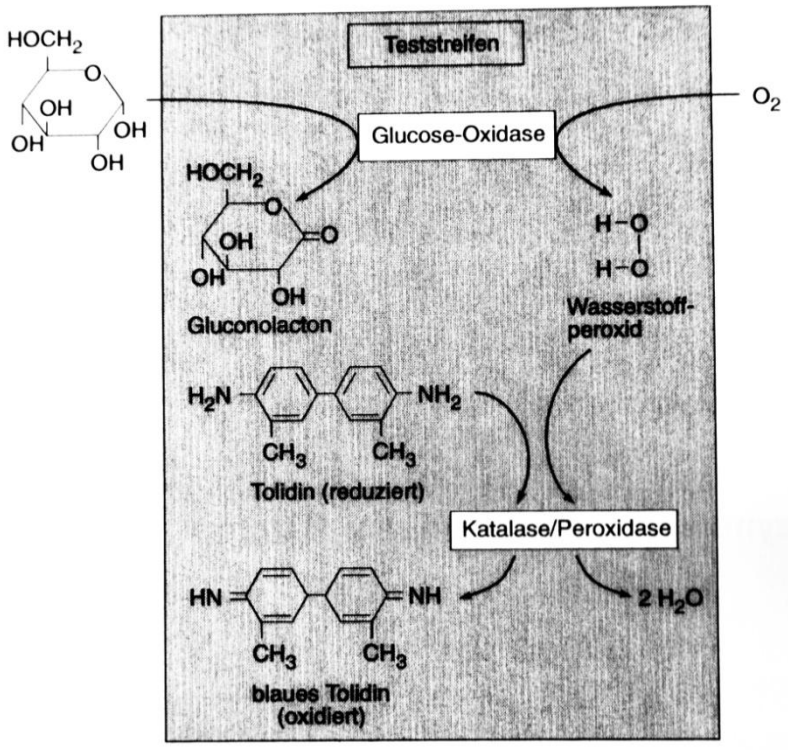


Abbildung 52: Reaktionsabläufe auf einem Glucoseteststäbchen bei einem GOD-Test [9, S. 252].

Versuch 7: Unterscheidung von roher und erhitzter Milch über das Schardinger – Enzym [73, S.110][86, S.19f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: 2 Reagenzgläser, 2 Gummistopfen für Reagenzgläser, Reagenzglasständer, 50 ml Messzylinder, 2 Stück 5 ml Messpipetten, 250 ml Becherglas, Heizplatte, Tropfpipette, Rohmilch, Frischmilch,

Chemikalien: 0,4%ige Benzaldehydlösung, 0,04%ige Methylenblaulösung, dickflüssiges Paraffinöl

Sicherheitshinweise: Benzaldehyd und Methylenblau sind gesundheitsschädlich!

Durchführung: Sowohl 10 ml Frischmilch, als auch 10 ml Rohmilch werden in jeweils ein Reagenzglas gefüllt und mit jeweils 1,5 ml Benzaldehydlösung und 1 ml Methylenblaulösung versetzt.

Beide Reagenzgläser werden in einem mit Wasser gefüllten Becherglas mithilfe einer Heizplatte auf 45°C erhitzt.

Ergebnis: Nach ca. 5 Minuten kommt es bei der Rohmilch zur Entfärbung, die bei der Frischmilch entweder viel später, oder gar nicht eintritt.

Erklärung: In der Rohmilch ist das sogenannte Schardinger-Enzym, eine Aldehyd-Dehydrogenase, enthalten. Beim Erhitzen auf 60°C wird dieses Enzym denaturiert, wodurch es in Frischmilch nicht mehr nachzuweisen ist.

Das Schardinger-Enzym katalysiert die Dehydrierung des Benzaldehyds zur Benzoesäure. Des Weiteren wird Wasserstoff auf Methylenblau übertragen, wodurch dieses in seine Leukoform übergeht.

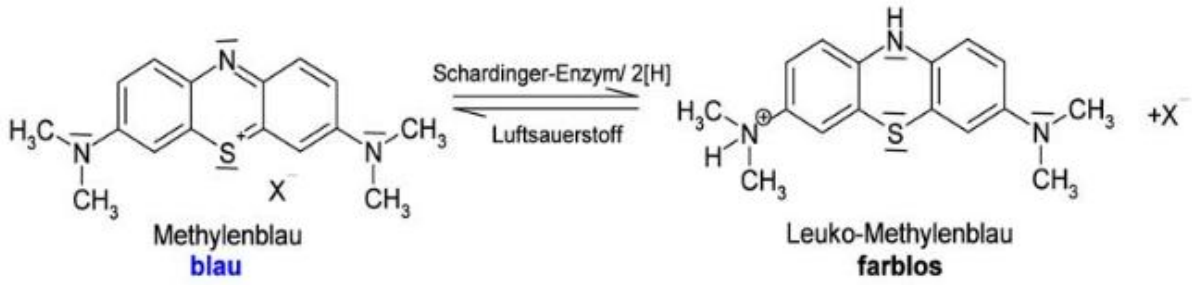


Abbildung 53: Katalysierte Reaktion des Schardinger-Enzyms [86, S.20].

Das Paraffinöl dient bei diesem Versuch lediglich als Schutzschicht vor Luftsauerstoff.

Versuch 8: Verminderung der enzymatischen Bräunung von Obst aufgrund von Phenoloxidasen [12, S.88f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: 4 Petrischalen, Messer, Reibe, Zitronensaft, Äpfel

Chemikalien: Ascorbinsäure-Lösung (1 Spatelspitze in 10 ml destilliertem Wasser), Zitronensäure-Lösung (1 Spatelspitze in 10 ml destilliertem Wasser)

Durchführung: Ein Apfel wird geschält, in kleine Stücke geschnitten und gleichmäßig auf 4 Petrischalen verteilt.

Ein Teil eines Apfels wird mittels Reibe zu Brei zerrieben, und dieser wird ebenfalls gleichmäßig auf die vier Petrischalen verteilt.

Petrischale 1: Die Apfelreste werden mit Zitronensaft beträufelt.

Petrischale 2: Die Apfelreste werden mit Ascorbinsäure beträufelt.

Petrischale 3: Die Apfelreste werden mit Zitronensäure beträufelt.

Petrischale 4: kein weiterer Zusatz

Ergebnis: Die Apfelstücke in den Petrischalen 3 und 4 färben sich braun, während sich die Apfelstücke in den Petrischalen 1 und 2 wenig bis gar nicht braun färben. Dabei fällt außerdem auf, dass der Apfelbrei stärker braun gefärbt ist, als die geschnittenen Apfelstücke.

Erklärung: Pflanzen enthalten in ihren Zellen das Enzym Polyphenoloxidase und dessen vom Enzym räumlich getrennte Substrate, die Polyphenole. Werden die Zellen des Versuchsobjektes zerstört, wie z.B. durch das Aufschneiden des Apfels oder durch dessen Zerreibung, bekommt das Enzym die Möglichkeit das Substrat umzusetzen. Da beim Zerreiben des Apfels mehr Zellen zerstört werden, als beim Zerschneiden, verläuft die Reaktion bei Erstgenanntem schneller.

Polyphenoloxidasen katalysieren die Hydroxylierung von Monophenolen zu Diphenolen und weiter zu Dichinonen. In einer Reihe weiterer Stoffwechselschritte entstehen aus Dichinonen Melanine, die für die dunkle Färbung verantwortlich sind.

Neben den Phenolen als Substrate benötigen Phenoloxidasen für ihre Reaktion auch Sauerstoff. Dieser dient als Oxidationsmittel, um Phenole oxidieren zu können.

Wie in diesem Versuch sichtbar, kann Ascorbinsäure, die auch in Zitronensaft enthalten ist, diese enzymatische Bräunung verhindern. Ascorbinsäure hat ein recht niedriges Redoxpotential und dient somit den Polyphenoloxidasen anstatt der Phenole als Substrat. Ascorbinsäure wird von den Polyphenoloxidasen zu Dehydroascorbinsäure oxidiert, während ihre eigentlichen Substrate, die Phenole, nicht angegriffen werden und es folglich zu keiner Braunfärbung kommt.

Abbildung 54: Darstellung des Experiments "Verminderung der enzymatischen Bräunung von Obst aufgrund von Phenoloxidasen".

Versuch 9: Nachweis der Polyphenoloxidasen in Bananen [87]

Dauer: 10 Minuten

Materialien: Becherglas, Stoppuhr, Heizplatte, Bananen

Durchführung: Ein Bananenlängsstreifen wird 5 – 15 Sekunden lang zur Hälfte in kochendes Wasser gehalten und anschließend mit Luft in Berührung gebracht.

Nun wird ein weiterer Bananenlängsstreifen für 1 – 2 Minuten zur Hälfte in kochendes Wasser gehalten und anschließend mit Luft in Berührung gebracht.

Ergebnis: Nach dem Eintauchen des Bananenlängsstreifens für 5 – 15 Sekunden ist eine Braunfärbung des gesamten eingetauchten Teiles zu sehen.

Nach dem Eintauchen des Bananenlängsstreifens für 1 – 2 Minuten ist zu beobachten, dass das eingetauchte Stück kaum bis gar nicht braun gefärbt ist, wobei der nicht eingetauchte Teil des Bananenstreifens stark braun gefärbt ist.

Erklärung: Polyphenoloxidasen oxidieren Phenole in einer längeren Reaktionsabfolge zu Melanin-Pigmenten (siehe Versuch 8). Durch langes Kochen werden diese Enzyme denaturiert. Folglich kann die enzymatische Reaktion nicht stattfinden und die Bananenschalen bleiben gelb.

Heißer Wasserdampf ist auf der einen Seite nicht zu heiß, um Enzyme zu denaturieren, schädigt andererseits allerdings die Zellen. Somit gelangen Polyphenoloxidasen zu ihren Substraten und die enzymatische Bräunungsreaktion kann ablaufen. Diese zeigt sich durch eine braune Färbung des nicht eingetauchten Teils der Banane.

Abbildung 55: Darstellung der Wirkung von kochendem Wasser auf eine Bananenschale bei einer Wirkungsdauer von 15 Sekunden.

Abbildung 56: Darstellung der Wirkung von kochendem Wasser auf eine Bananenschale bei einer Wirkungsdauer von 2 Minuten.

Versuch 10: Todesringe und Todesstreifen aufgrund von Phenoloxidasen [12, S.87f.]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: Laubblätter, Becherglas, Bunsenbrenner, Heizplatte, Reagenzglasklammer, Glasstab

Durchführung: In einem Becherglas wird Wasser bis zum Kochen erhitzt. Mithilfe einer Holzklammer wird ein Laubblatt am Rand dieses Becherglases so befestigt, dass ein Teil des Blattes in das kochende Wasser taucht.

Ein Glasstab wird mittels Bunsenbrenner 30 Sekunden lang erhitzt und anschließend sanft auf ein weiteres Laubblatt gedrückt.

Ergebnis: Der Teil des Blattes, der in kochendes Wasser eingetaucht worden ist, zeigt sich hellgrün, während über der Wasseroberfläche ein braunschwarzer Streifen auf dem Blatt zu sehen ist. Darüber sieht das Blatt unverändert aus.

An der Stelle, auf die der heiße Glasstab gedrückt worden ist, ist eine grüne Kreisfläche zu sehen, die von einem braunschwarzen Kreis umgeben ist.

Erklärung: In pflanzlichen Zellen befinden sich Phenoloxidasen (siehe Versuch 8).

Wird das Blatt in kochendes Wasser getaucht, werden sowohl Zellen, als auch Enzyme zerstört. Dadurch kann die Bräunungsreaktion nicht ablaufen, und es kommt zu keiner Farbänderung. Oberhalb der Wasseroberfläche reicht der heiße Wasserdampf aus, um Zellen zu zerstören, nicht aber, um Enzyme zu denaturieren. Die enzymatische Bräunungsreaktion findet statt, was sich durch eine braune Färbung zeigt. Nach gleichem Prinzip lässt sich auch die Bildung eines „Todesringes“ erklären, der nach Drücken eines heißen Glasstabes auf ein Laubblatt entsteht.

Abbildung 57: Darstellung der Todesringe auf Blättern.

Versuch 11: Nachweis von Peroxidasen in Naturstoffen [71, S.251]

Dauer: 15 Minuten

Materialien: 8 Stück 100 ml Bechergläser, Reibe, 2 Tücher, 250 ml Becherglas, 2 Reagenzgläser, Bunsenbrenner, Meerrettich, rohe Kartoffel,

Chemikalien: 3%ige Wasserstoffperoxidlösung, Pyrogallol, destilliertes Wasser

Sicherheitshinweise: Wasserstoffperoxid gilt als brandfördernd, ätzend und sensibilisierend! Pyrogallol ist gesundheitsschädlich!

Durchführung: Mithilfe einer Reibe werden Meerrettich und eine Kartoffel zerrieben und in jeweils einem Becherglas mit je 10 ml destilliertem Wasser vermischt. Dieser Brei wird mittels Tuch ausgepresst. Jeweils die Hälfte dieses Filtrats wird in jeweils einem Reagenzglas zum Sieden erhitzt.

Nun werden 2,5 ml Wasserstoffperoxidlösung mit 200 ml destilliertem Wasser verdünnt und mit 25 mg Pyrogallol versehen. Diese Lösung wird auf 4 Bechergläser aufgeteilt. Nun wird eines dieser Bechergläser mit rohem Meerrettich-Presssaft, eines mit erhitztem Meerrettich-Presssaft, ein weiteres mit rohem Kartoffel-Presssaft und ein viertes mit erhitztem Kartoffel-Presssaft versehen.

Ergebnis: Die Inhalte der Bechergläser mit rohen Presssäften färben sich bereits nach kurzer Zeit rot, während die Inhalte der Bechergläser mit erhitzten Presssäften ihre Farbe nicht ändern.

Erklärung: Die in Organismen enthaltenen Peroxidasen katalysieren die Reduktion des für die meisten Lebewesen schädlichen Wasserstoffperoxids. Dabei wird Sauerstoff von Wasserstoffperoxid auf Pyrogallol übertragen, wodurch dieses zum roten Purpurogallin oxidiert wird.

Durch Hitze werden die Peroxidasen denaturiert, wodurch die Reaktion von Pyrogallol zu Purpurogallin nicht stattfinden kann und es folglich zu keiner Farbänderung der Lösung kommt.

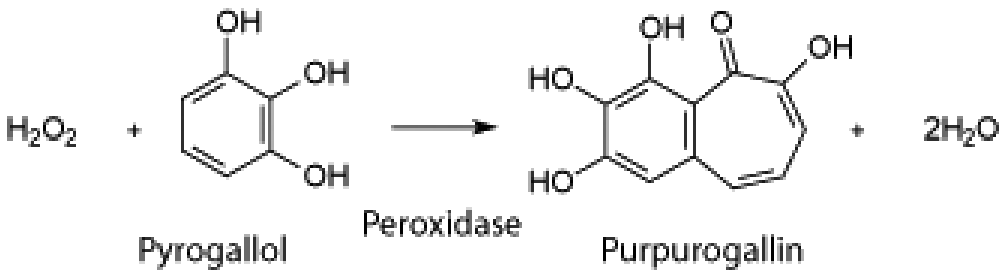


Abbildung 58: Reaktion des Pyrogallols zu Purpurogallin (aus [88]).

23 Schlussfolgerung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Einbringen der Kompetenzorientierung in den Chemieunterricht besonders wichtig ist, um einen zielbringenden und langanhaltenden Wissenserwerb zu garantieren. Anhand des Themenkomplexes Enzymologie wurde veranschaulicht, dass es viele unterschiedliche Möglichkeiten gibt, verschiedene Kompetenzen der Lernenden zu fördern. Dazu ist es besonders wichtig, Unterrichtseinheiten detailliert zu planen und genau festzulegen, welche Kompetenzen der Schüler/innen gefordert und gefördert werden sollen. Diese Vorbereitung nimmt zwar einiges an Zeit in Anspruch, liefert aber in weiterer Folge einen enormen Lernerfolg für die Schüler/innen.

Besonders in den naturwissenschaftlichen Gegenständen ist es wichtig, sowohl die experimentelle Kompetenz, als auch die Lesekompetenz der Lernenden zu fördern. Sinnerfassendes Lesen gilt nicht nur im Deutsch-Unterricht als Grundkompetenz, sondern zeigt sich auch im Chemieunterricht als besonders bedeutsam, da es neben dem eigenständigen Experimentieren das selbstständige Lernen und Recherchieren der Schüler/innen ermöglicht.

Diese Arbeit zeigt, dass experimenteller, kompetenzorientierter Chemieunterricht nicht nur an einer naturwissenschaftlich gut ausgestatteten AHS, sondern auch an den BHS gut funktioniert, die häufig nur über eine geringe naturwissenschaftliche Ausstattung verfügen. Dazu muss jedoch neben dem entsprechenden Lehrplan sowohl auf räumliche, als auch auf sonstige Rahmenbedingungen dieses Schultyps Rücksicht genommen werden.

Das Beispiel Enzymologie zeigt, dass auch ein sehr komplexes Themengebiet einfach und mit einem gewissen Alltagsbezug in die Schule gebracht und dort ohne ausgefallene Materialien und Chemikalien behandelt werden kann. Somit dient diese Arbeit als Anreiz für Lehrer/innen berufsbildender höherer Schulen, einen experimentellen, kompetenzorientierten Unterricht auch ohne großen materiellen Aufwand durchzuführen.

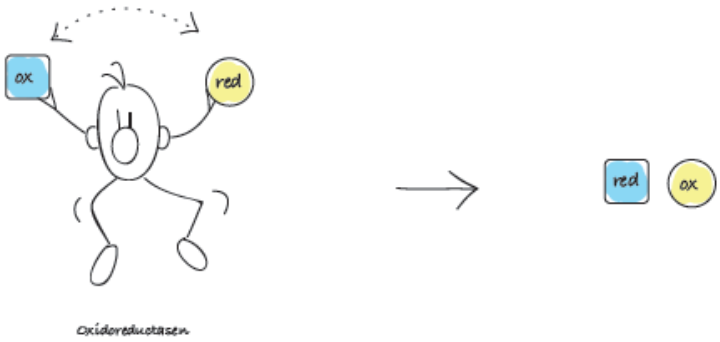
Es ist besonders wichtig, dass Kompetenzen bereits von den ersten Schulstufen an gefördert und Schüler/innen damit vertraut gemacht werden eigenständig Probleme zu lösen, um sich somit ein nachhaltiges Wissen aufzubauen, denn:

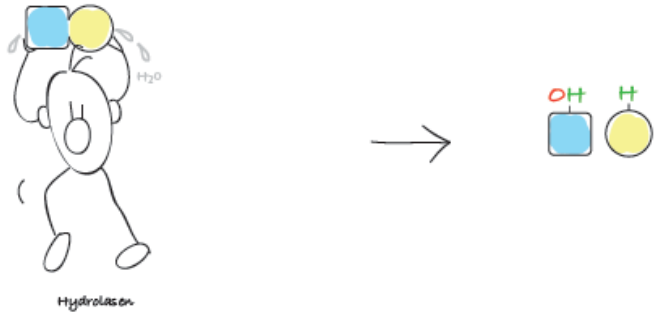
„The best way to learn is to do, to ask and to do. The best way to teach is to make students ask, and do. Don´t preach facts, stimulate acts“ (Mathematiker Paul Halmos [57, S. 466]).

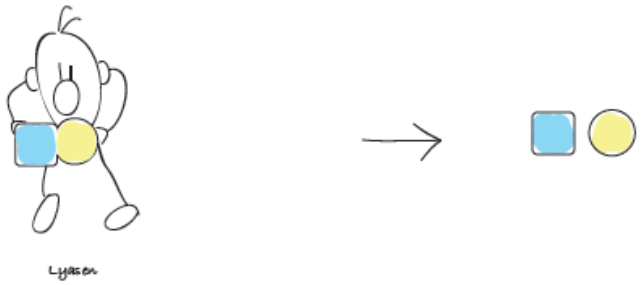
24 Anhang

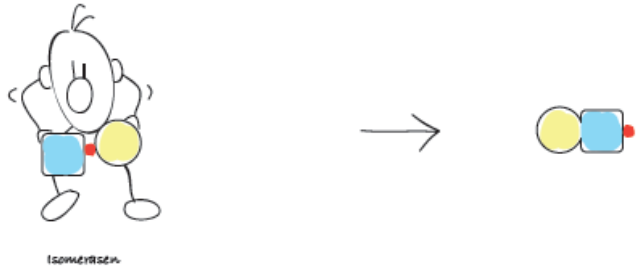
24.1 Illustrationen zu den sechs Enzymklassen

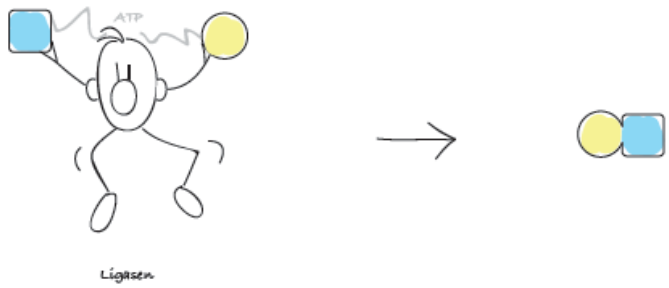
Nachstehend werden die von mir erstellten Illustrationen zu den sechs Enzymklassen dargestellt, auf diese in Kapitel 20 näher eingegangen worden ist.




H_2O
OH
H
Hydrolasen


Lyasen


Isomerasen


ATP
Ligasen

24.2 Erklärung der in Kapitel 22 verwendeten Gefahrenpiktogramme

Nachstehend werden die Gefahrenpiktogramme beschrieben, die eine einheitliche Kennzeichnung von Chemikalien ermöglichen und auf mögliche Gefahren bei der Arbeit mit diesen hinweisen.

Tabelle 6: Erklärung der neuen Gefahrenpiktogramme [95].

Piktogramm	Bezeichnung	Gefahrenbezeichnung
	Explodierende Bombe	explosionsgefährlich
	Flamme	leicht/hoch entzündlich
	Flamme über einem Kreis	brandfördernd
	Gasflasche	keine Entsprechung
	Ätzwirkung	ätzend
	Totenkopf mit gekreuzten Knochen	giftig

	Dickes Ausrufezeichensymbol	reizend
	Gesundheitsgefahr	gesundheitsschädlich
	Umwelt	umweltgefährlich

24.3 H- und P- Sätze [96]

Korrelierend mit den in 24.2 beschriebenen Gefahrenpiktogrammen, werden nun die entsprechenden Gefahren- und Sicherheitshinweise näher erklärt.

Gefahrenhinweise werden mithilfe sogenannter H-Sätze beschrieben, die sich aus einer dreistelligen Ziffer zusammensetzen, wobei die erste Ziffer die entsprechende Gefahrenklasse angibt (2 = physikalische Gefahr, 3 = Gesundheitsgefahr, 4 = Umweltgefahr).

Sicherheitshinweise werden mithilfe sogenannter P-Sätze beschrieben, die sich ebenfalls aus einer dreistelligen Zahl zusammensetzen. Die erste dieser Ziffern beschreibt die Kategorie präventiver Sicherheitsempfehlungen (1 = Allgemeines, 2 = Prävention, 3 = Reaktion, 4 = Lagerung…).

Nachstehend wird als Beispiel ordnungsgemäßer Gefahrenkennzeichnung die Kennzeichnung von Isopropylalkohol dargestellt.

Gefahrenklasse	Entzündbare Flüssigkeiten	schwere Augenschädigung/ Augenreizung	spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition
Einstufung	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 3
GHS-Piktogramm			
Signalwörter	Gefahr	Achtung	Achtung
Gefahrenhinweise	H225 Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar	H319 Verursacht schwere Augenreizung	H336 Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen

Abbildung 59: Darstellung ordnungsgemäßer Gefahrenstoffkennzeichnung anhand des Isopropylalkohols [96].

25 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Enzym-Substrat Komplex. Geometrische und elektronische Komplementarität beruhen auf nicht kovalenten Wechselwirkungen (aus [2, S.356]) 16
Abbildung 2: Reaktion von L-Lactat zu Pyruyat mittels Lactat-Dehydrogenase [15, S.179]. 20
Abbildung 3: Reaktion von Alanin und a-Ketoglutarat zu Pyruvat und L-Glutamat mittels Alanin-Transaminase [25, S.179]. 21
Abbildung 4: Reaktion von Pyrophosphat und Wasser zu Phosphat mittels Pyrophosphatase [15, S.179]. 21
Abbildung 5: Reaktion von Pyruvat zu Acetaldehyd mittels Pyruvat-Decarboxylase [15, S.180]. 22
Abbildung 6: Reaktion von L-Alanin zu D-Alanin mittels Alanin-Racemase [15, S.180]. 23
Abbildung 7: Reaktion von L-Glutamat zu L-Glutamin mittels Glutamin-Synthetase [15, S.180]. 24
Abbildung 8: Darstellung der 20 proteinogenen Aminosäuren [92]. 26
Abbildung 9: Nicotinamidadenindinucleotid [22, S.55]. 32
Abbildung 10: Reaktionskoordinatendiagramm [2, S.359]. 34
Abbildung 11: Abhängigkeit der Enzymaktivität vom pH-Wert. Aspartatreste des Pepsins im aktiven Zentrum verlangen einen niedrigeren pH-Wert der Umgebung, als die sich im katalytischen Zentrum des Trypsins befindenen Histidinreste [13, S.181]. 42
Abbildung 12: Abhängigkeit der Enzymaktivität von der Temperatur. Charakteristische Temperaturoptima sind abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen des Enzyms [13, S.181]. 43
Abbildung 13: Abhängigkeit der Initialgeschwindigkeit enzymatischer Reaktionen von der Substratkonzentration [19, S. 261]. 46
Abbildung 14: Lineweaver-Purk-Darstellung der Michaelis-Menten-Gleichung [19, S. 264]. 48
Abbildung 15: Auftragung von v0 gegen [S] für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines kompetitiven Inhibitors [2, S.412]. 52

Abbildung 16: Lineweaver-Burk-Diagramm für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines unkompetitiven Inhibitors [2, S.415]. 54
Abbildung 17: Lineweaver-Burk-Diagramm für eine Michaelis-Menten-Reaktion in Anwesenheit verschiedener Konzentrationen eines nichtkompetitiven Inhibitors [2, S.418]. 55
Abbildung 18: österreichisches Kompetenzmodell Naturwissenschaften [93, S.1]. 71
Abbildung 19: Darstellung der Arbeit mit Kompetenzrastern [44, S. 12]. 73
Abbildung 20: Fünf Dimensionen der Unterrichtsveränderung [45, S.146]. 76
Abbildung 21: Experimentierzyklus. Angelehnt. In Anlehnung an [56, S. 135]. 84
Abbildung 22: Spinnenmodell experimenteller Kompetenzen. Für die Planung gilt: 0 = unwichtig, 1 = bedeutsam, 2 = sehr wichtig; Für die Diagnose gilt: 0 = niedriges Niveau, 1 = mittleres Niveau, 2 = hohes Niveau [42, S.210]..... 90
Abbildung 23: Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht zum Thema Schwermetalle im Bleistift [89]. 91
Abbildung 24: Spinnenmodell zum Experiment mit Enzymen und Schwermetallen nach beschriebener Aufgabenstellung. 92
Abbildung 25: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Katalase. 93
Abbildung 26: Spinnenmodell zum Experiment zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Katalase. 94
Abbildung 27: Illustration des Reaktionsmechanismus von Transferasen. 101
Abbildung 28: Illustration des Reaktionsmechanismus von Hydrolasen. 101
Abbildung 29: Illustration des Reaktionsmechanismus von Oxidoreduktasen. 102
Abbildung 30: Ausschnitt aus dem Lehrplan für HLWs aus dem Jahr 2003 [67, S. 29]. 103
Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Entwurf des neuen Lehrplans für HLWs. Stand 2012 [68, S. 1]. 103
Abbildung 32: Darstellung des Experiments "Hydrolyse von Harnstoff durch Urease " (a)..... 108
Abbildung 33: Darstellung des Experiments "Hydrolyse von Harnstoff durch Urease" (b). 108
Abbildung 34: Darstellung des Versuches "Nachweis der Urease im Boden"..... 109
Abbildung 35: Darstellung eines negativen Glucose-Nachweises. 113

Abbildung 36: Darstellung eines positiven Glucose-Nachweises. 113
Abbildung 37: Darstellung eines positiven Stärke-Nachweises mittels Lugolscher Lösung. 114
Abbildung 38: Darstellung des Versuches "Nachweis von Amylasen in Waschmitteln". Im linken Deckel befindet sich der erstarre Pudding. Im rechten Deckel befindet sich der aufgrund der Amylase noch dickflüssige Pudding. 117
Abbildung 39: Darstellung der durch Cellulase verfärbten Flüssigkeit. 120
Abbildung 40: Darstellung von Öl in Wasser ohne Lipasenzusatz. 121
Abbildung 41: Darstellung von Öl in Wasser mit Lipasenzusatz. 121
Abbildung 42: Erhärteter Pudding ohne Honig (links) und zähflüssiger Pudding mit Honig (rechts). 124
Abbildung 43: Einfluss der Protease Bromelain auf Gummibärchen. 126
Abbildung 44: Darstellung des Experiments "Nachweis der Myrosinase in Senf". 128
Abbildung 45: Darstellung des Experimentss "Nachweis der Alliinase in der Zwiebel"..... 130
Abbildung 46: Darstellung der katalytischen Eigenschaften von Katalase. 133
Abbildung 47: Darstellung der katalytischen Eigenschaften von Braunstein. Es wurde für diesen Versuch eine Zink-Braunstein-Tablette verwendet..... 133
Abbildung 48: Darstellung der katalytischen Eigenschaft der Katalase in Leber. 136
Abbildung 49: Darstellung der Hemmung von Katalse durch Schwermetalle. ... 136
Abbildung 50: Darstellung der Hemmung der Katalase durch Hitze. 137
Abbildung 51: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wechselzahl [9, S. 253]..... 138
Abbildung 52: Reaktionsabläufe auf einem Glucoseteststäbchen bei einem GOD-Test [9, S. 252]. 140
Abbildung 53: Katalysierte Reaktion des Schardinger-Enzyms [86, S.20]. 142
Abbildung 54: Darstellung des Experiments "Verminderung der enzymatischen Bräunung von Obst aufgrund von Phenoloxidasen". 143
Abbildung 55: Darstellung der Wirkung von kochendem Wasser auf eine Bananenschale bei einer Wirkungsdauer von 15 Sekunden. 144
Abbildung 56: Darstellung der Wirkung von kochendem Wasser auf eine Bananenschale bei einer Wirkungsdauer von 2 Minuten. 144
Abbildung 57: Darstellung der Todesringe auf Blättern. 145

Abbildung 58: Reaktion des Pyrogallols zu Purpurogallin (aus [88]). 147
Abbildung 59: Darstellung ordnungsgemäßer Gefahrenstoffkennzeichnung anhand des Isopropylalkohols [96]. 153

26 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die sechs Enzymklassen und die entsprechenden charakteristischen Enzyme. 25
Tabelle 2: Darstellung von Enzymen der Backindustrie. 64
Tabelle 3: Darstellung der Daten eines Aufgabenbeispiels nach [56, S.125]. 83
Tabelle 4: Kompetenzentwicklungsmodell nach Hammann (aus [42, S.208]). 88
Tabelle 5: Teilkompetenzen eines Experimentes nach Schreiber, Theyßen & Schecker (aus [42, S.209]). 89
Tabelle 6: Erklärung der neuen Gefahrenpiktogramme [95]. 151

27 Literaturverzeichnis

[1] Schmidkunz H., Pfeifer P., Sommer K.: Enzyme – Grundwissen im Überblick. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006, 2/06, S.8-11.

[2] Voet D., Voet J.G., Pratt Ch.W.: Lehrbuch der Biochemie. 2. Auflage, WILEY-VCH-Verlag, Weinheim 2010.

[3] Heller W., Naumer H., Knüttel A.: Enzyme und enzymatische Analyse. Impulse und Materialien für die kreative Unterrichtsgestaltung – Chemie. RAABE-ÖBV, Wien 1996, S. 4-31.

[4] Hassinger H., Wiebusch R-D.: Experimentelle Enzymologie. 1. Auflage, Diesterweg-Salle & Sauerländer, 1977.

[5] Born A., Brott A., Engelhardt B., et. al.: Biologie Oberstufe. Gesamtband. 2. Auflage, Cornelsen Schulverlage GmbH, Berlin 2013.

[6] Dose K.: Biochemie. Eine Einführung. 5. Auflage, Springer Verlag, Mainz 1996.

[7] Schmid R.: Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik. WILEY-VCH – Verlag, Weinheim 2002.

[8] Riedel E.: Allgemeine und anorganische Chemie. 10. Auflage, De Gruyter, Berlin 2010.

[9] Bannwarth H., Kremer B.P., Massing D.: Stoffe und Stoffwechsel. Grundlagen. Abläufe. Experimente. Quelle & Meyer Verlag, Wiesbaden 1996.

[10] Richter G.: Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels. 6. Auflage, Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, New York 1998.

[11] Arnold K., Dietrich V., Eberle A., et.al.: Chemie Oberstufe. Gesamtband. Allgemeine Chemie. Physikalische Chemie. Organische Chemie. 1. Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin 2010.

[12] Wild A., Schmitt V.: Biochemische und physiologische Versuche mit Pflanzen. Für Studium und Unterricht im Fach Biologie. Springer-Verlag, Berlin 2012.

[13] Munk K., et. al.: Taschenlehrbuch Biologie. Biochemie. Zellbiologie. Thieme Verlag, Stuttgart 2008.

[14] Baltes W.: Lebensmittelchemie. 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2007.

[15] Horton H. R., Moran L.A., Scrimgenour K.G., et.al.: Biochemie. 4. Auflage, Pearson Studium, München 2008.

[16] Aebi H., Brodbeck U., Kohler H., et. al.: Einführung in die praktische Biochemie. Für Studierende der Medizin, Veterinärmedizin, Pharmazie, Biochemie und Biologie. 3. Auflage, Basel, München: Karger, 1982.

[17] Kreutzig T.: Kurzlehrbuch Biochemie. 12. Auflage, Urban & Fischer, München 2006.

[18] Koolman J., Röhm K.: Taschenatlas Biochemie des Menschen. 4. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York 2009.

[19] Nelson D., Cox M.: Lehninger Biochemie. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2011.

[20] Campbell N., Reece J., et.al.: Biologie. 8. Auflage, Pearson Studium, München 2009.

[21] Berg J., Tymoczko J., Stryer L.: Stryer Biochemie. 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2007.

[22] Müller-Esterl W.: Biochemie. Eine Einführung für Mediziner und Naturwissenschaftler. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011.

[23] Buddecke E.: Grundriss der Biochemie. Für Studierende der Medizin, Zahnmedizin und Naturwissenschaften. 9.Auflage, de Gruyter-Verlag, Berlin, New York 1994.

[24] Koolman J., Meoller H., Röhm K-H.: Kaffee, Käse, Karies. Biochemie im Alltag. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, New York 1998.

[25] Brandenburger T., Bajorat T.: Fallbuch Biochemie. 1. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2006.

[26] Horn F.: Biochemie des Menschen: Das Lehrbuch für das Medizinstudium. 5.Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2012.

[27] Lüllmann H., Mohr K., Hein L.: Pharmakologie und Toxikologie. 17. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2010.

[28] Dettmer U., Folkerts M., Kächler E., Sönnichsen A.: Intensivkurs Biochemie. 1. Auflage, Urban & Fischer Verlag, München 2005.

[29] Doenecke D., Koolman J., Fuchs G., Gerok W.: Karlsons Biochemie und Pathobiochemie. 15. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2005.

[30] Dellweg H.: Biotechnologie. Grundlagen und Verfahren. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 1987.

[31] Remschmidt C.: Einsatz von Enzymen im experimentellen Schulunterricht. Diplomarbeit. S. 28-29, Graz: 2000.

[32] Widhalm K.: Ernährungsmedizin. 3. Auflage, Deutscher Ärzte-Verlag, Wien 2009.

[33] Dreesmann D.: Aber bitte mit Gentechnik? Gentechnisch hergestellte Enzyme als Helfer der Lebensmittelindurstrie. In: Praxis der Naturwissenschaften Biologie in der Schule, Heft 7, 61. Jahrgang 2012.

[34] Hutterer R.: Fit in Biochemie: Das Prüfungstraining für Mediziner, Chemiker und Biologen. 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2010.

[35] Ebner M.: Eignung von Branchenstrukturanalysen in schnell wachsenden Märkten am Beispiel der HIV-Medikamentenproduktion. Diplomarbeiten Agentur diplom.de, 2002.

[36] Pilz G.: Biotechnologie. Anwendung, Branchenentwicklung, Investitionschancen. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2010.

[37] Krömker V.: Kurzes Lehrbuch Milchkunde und Milchhygiene. Enke – Verlag, Stuttgart 2006.

[38] Präve P., Faust U., Sitting W., Sukatsch D.A.: Handbuch der Biotechnologie. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien 1994.

[39] Lösche K.: Enzyme in der Lebensmitteltechnologie. 1. Auflage, Behrs-Verlag, Hamburg 2000.

[40] Wagner G.: Waschmittel. Chemie, Umwelt, Nachhaltigkeit. 4. Auflage, Wiley – VCH Verlag, Weinheim 2010.

[41] Graf E.: Fleckenentfernung durch Enzyme. In: Unterricht Biologie, 22. Jahrgang 1998, S.19-21.

[42] Paechter M., u.a. (Hrsg.): Handbuch kompetenzorientierter Unterricht. Beltz Verlag, Weinheim und Basel 2012.

[43] Weinert F.E.: Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F.E. (Hrsg.): Leistungsmessung in Schulen. Beltz, S. 17-31, Weinheim 2001.

[44] Beer R., Benischek I.: Aspekte kompetenzorientierten Lernens und Lehrens. In BIFIE (Hrsg.): Kompetenzorientierter Unterricht in Theorie und Praxis. Leykam, Graz 2011.

[45] Tschekan K.: Kompetenzorientiert unterrichten. Eine Didaktik. 3. Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin 2011.

[46] Reisse W.: Kompetenzorientierte Aufgabenentwicklung. Ein Lehrerhandbuch für die Sekundarstufen. AULIS Verlag Deubner, Köln 2008.

[47] Schreiner C.: PISA 2006: Erste Ergebnisse: Naturwissenschaft – Lesen – Mathematik. Leykam, Graz 2007.

[48] Sormann L.: Umsetzung von Kompetenzmodellen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Diplomarbeit, Graz 2011.

[49] Schecker H., Parchmann I.: Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 12. Jahrgang, 2006.

[50] Klieme E. et al.: Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Bundeministerium für Bildung und Forschung, Bonn 2003.

[51] univie: https://aeccc.univie.ac.at/projekte/bildungsstandards-8-schulstufe/ (letzter Zugriff: 30.06.2014)

[52] BIFIE: https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf, Seite 1-5 (letzter Zugriff: 13.05.2014)

[53] Zeitler S., Köller O., Tesch B.: Bildungsstandards und ihre Implikationen für Qualitätssicherung und Qualitätsentwicklung. In: Gehrmann A., Henricks U., Lüders M. (Hrsg.): Bildungsstandards und Kompetenzmodelle. Beiträge zu einer aktuellen Diskussion über Schule, Lehrerbildung und Unterricht. Klinkhardt, S. 23-36, Bad Heilbrunn 2010.

[54] Krause U-M.: Feedback und kooperatives Lernen. In: Rost, D.H. (Hrsg.): Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie. Waxmann-Verlag, Münster 2007.

[55] Heimlich U., Wember F. B. (Hrsg.): Didaktik des Unterrichts im Förderschwerpunkt Lernen. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 2007.

[56] Labudde P. (Hrsg.): Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1.-9. Schuljahr. 2. Auflage. Haupt-Verlag, Bern 2013.

[57] Halmos P.: The Teaching of Problem Solving. The American Mathematical. Vol. 82, S. 466-476, 1975.

[58] Anton M.A.: Kompendium Chemiedidaktik. Bad Heilbrunn, Julius Klinkhardt Verlag, 2008

[59] Kircher E., Girwidz R., Häußler P.: Physikdidaktik. Eine Einführung. Springer Verlag, Berlin 2001.

[60] Lugitsch J.: Kompetenzen im experimentellen naturwissenschaftlichen Unterricht. Diplomarbeit. Graz 2011.

[61] Schlichter N., Terranova F.: Lesekompetenz und naturwissenschaftliche Kompetenz anhand PISA und TIMMS. Studienarbeit. Saarland 2004.

[62] BIFIE: https://www.bifie.at/system/files/dl/pisa12_zusammenfassung_ergebnisse_2013-12-03.pdf Seite 1-5 (letzter Zugriff: 30.06.2014)

[63] Artelt, Baumert, Klieme et.al. (Hrsg.): Zusammenfassung zentraler Befunde. Programme for internal student assessment. Schülerleistungen im internationalen Vergleich. Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin 2001.

[64] Metzger S.: Lesekompetenz und deren schulische Förderung. Studienarbeit. Marburg, 2005.

[65] Literacy: http://www.literacy.at/fileadmin/literacy/redaktion/pdf/Theorie_ZieleStileStrategien.pdf (letzter Zugriff: 26.05.2014)

[66] BMUKK (Hrsg.): Textverständnis in allen Fächern. 10 Lesestrategien im Unterrichtsgegenstand Chemie. Lehrer/innenbildung Literacy, PH Wien, Mag. Dr. Elisabeth Kulnigg

[67] berufsbildendeschulen: http://www.abc.berufsbildendeschulen.at/upload/1144_FSwB%20und%20HLW.pdf (letzter Zugriff: 28.05.2014)

[68] HLW: www.hlw.at/download/71/ (letzer Zugriff: 28.05.2014)

[69] hlw-dl: http://www.hlw-dl.at/cms/index.php/ausbildung/vital-neu (letzer Zugriff: 28.05.2014)

[70] Stapf H.: Chemische Schulversuche. Teil 3. Organische Chemie. 3. Auflage, VEB Verl. Volk u. Wissen, Berlin 1962.

[71] Just M.: Chemische Schulexperimente Band 2. Organische Chemie. 1. Auflage, Volk und Wissen Verlag, Berlin 1999.

[72] Baer H.-W.: Biologische Versuche im Unterricht. 2. Auflage, Volks und Wissen volkseigener Verlag, Berlin 1964.

[73] Grob P.: Unterrichtshilfen Naturwissenschaften. Einfache Schulversuche zur Lebensmittelchemie. 3.Auflage, Aulis Verlag Deubner, Köln 2000.

[74] Sommer K., Pfeifer P., Reiß J.: Praktische Alltagschemie. Aulis-Verlag, Köln 2011.

[75] Schwedt G.: Experimente mit Supermarktprodukten. 3. Auflage, Wiley VCH Verlag, Weinheim 2009.

[76] Keil M., Kremer B.P.: Wenn Monster munter werden: Einfache Experimente aus der Biologie. 1. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2003.

[77] Wieczorek R., Sommer K.: Ein Enzym für Frische und Geschmeidigkeit. Schulversuche mit dem Enzym Invertase. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006.

[78] Roth D., Tribus O., Sommer K.: Fruchtsaft und Gummibärchen. Experimente zur enzymatischen Hydrolyse von Gelatine. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006.

[79] Tröller E.: Die Ursache des Bitterwerdens von Milchprodukten bei Zusatz von frischer Ananas. In: UC 3 (1992) 14, S.44-45.

[80] Rajendran N.: Kulinarische Biologie und Chemie. Geheimnisse im Kochtopf. 2. Auflage, Knecht Verlag, Landau 2002.

[81] Schwedt G.: Experimente rund ums Kochen, Braten, Backen. 2. Auflage, Wiley VCH Verlag, Weinheim 2010.

[82] Hrsg: M. Mittelbach: Skriptum Organisch-chemische Schulversuche Laborübungen. Ausgabe 2013/14, S. 40.

[83] Rikus U.: Carboanhydrase – Ein Enzym, viele Wirkungen. Unterrichtsmodell für die Sekundarstufe II (11.-13. Schülerjahrgang). In: Unterricht Biologie, Nr. 238, S.41-47.

[84] Grois G., Masin Chr., Pesek, P.: 4. VCÖ-Chemietage. Workshopunterlagen zu Experimente mit Hand, Herz und Hirn, Salzburg 2014.

[85] Bruchmann E.-E.: Biochemisches Praktikum. Einfache Experimente für den Unterricht in mikrobiologischen, technologischen und landwirtschaftlichen Disziplinen. Paul Parey – Verlag, Berlin 1966.

[86] conatex: http://www.conatex.com/mediapool/versuchsanleitungen/VAD_Chemie_Milch-Kaese.pdf (letzter Zugriff 16.06.2014)

[87] Kockert, K.-H.; Schalko, W. Workshopunterlagen „Antioxidantien“; 57. Fortbildungswoche „Plus lucis“ 2003.

[88] Sigmaaldrich: http://www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzyme-explorer/analytical-enzymes/peroxidase-enzymes.html (letzter Zugriff: 16.06.2014)

[89] biologieunterricht: http://www.biologieunterricht.info/pool/pic/einstieg_schwermetalle.jpg (letzter Zugriff: 23.06.2014)

[90] schule-bw: http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/biotechnologie/material_biotec/unterricht_praktikum_biotec/milch/kaeseherstellung/download/Kaeseherstellung.pdf (letzter Zugriff: 30.06.2014)

[91] chemieunterricht: http://www.chemieunterricht.de/dc2/milch/lab.htm (letzter Zugriff: 30.06.2014)

[92] bs-wiki: www.bs-wiki.de (letzer Zugriff: 03.07.2014)

[93] BIFIE: https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf (03.07.2014)

[94] didaktikchemie: daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de (letzer Zugriff: 03.07.2014)

[95] Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Global_harmonisiertes_System_zur_Einstufung_und_Kennzeichnung_von_Chemikalien (letzter Zugriff: 03.07.2014)

[96] Pharmazeutische Zeitung: http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=28895 (letzter Zugriff: 03.07.2014)

28 Literaturverzeichnis alphabetisch

Aebi H., Brodbeck U., Kohler H., et. al.: Einführung in die praktische Biochemie. Für Studierende der Medizin, Veterinärmedizin, Pharmazie, Biochemie und Biologie. 3. Auflage, Basel, München: Karger, 1982

Anton M.A.: Kompendium Chemiedidaktik. Bad Heilbrunn, Julius Klinkhardt Verlag, 2008

Arnold K., Dietrich V., Eberle A., et.al.: Chemie Oberstufe. Gesamtband. Allgemeine Chemie. Physikalische Chemie. Organische Chemie. 1. Auflage, Berlin: Cornelsen Verlag, 2010

Artelt, Baumert, Klieme et.al. (Hrsg.): Zusammenfassung zentraler Befunde.

Baer H.-W.: Biologische Versuche im Unterricht. 2. Auflage, Berlin: Volks und Wissen volkseigener Verlag, 1964

Baltes W.: Lebensmittelchemie. 6. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2007

Bannwarth H., Kremer B.P., Massing D.: Stoffe und Stoffwechsel. Grundlagen. Abläufe. Experimente. Wiesbaden: Quelle & Meyer Verlag, 1996

Beer R., Benischek I.: Aspekte kompetenzorientierten Lernens und Lehrens. In BIFIE (Hrsg.): Kompetenzorientierter Unterricht in Theorie und Praxis. Graz: Leykam, 2011

Berg J., Tymoczko J., Stryer L.: Stryer Biochemie. 6. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2007

BMUKK (Hrsg.): Textverständnis in allen Fächern. 10 Lesestrategien im Unterrichtsgegenstand Chemie. Lehrer/innenbildung Literacy, PH Wien, Mag. Dr. Elisabeth Kulnigg

Born A., Brott A., Engelhardt B., et. al.: Biologie Oberstufe. Gesamtband. 2. Auflage, Cornelsen Schulverlage GmbH, Berlin 2013.

Brandenburger T., Bajorat T.: Fallbuch Biochemie. 1. Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2006

Bruchmann E.-E.: Biochemisches Praktikum. Einfache Experimente für den Unterricht in mikrobiologischen, technologischen und landwirtschaftlichen Disziplinen. Berlin: Paul Parey – Verlag, 1966

Buddecke E.: Grundriss der Biochemie. Für Studierende der Medizin, Zahnmedizin und Naturwissenschaften. 9.Auflage, Berlin, New York: de Gruyter 1994

Campbell N., Reece J., et.al.: Biologie. 8. Auflage, München: Pearson Studium, 2009

Dellweg H.: Biotechnologie. Grundlagen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 1987

Dettmer U., Folkerts M., Kächler E., Sönnichsen A.: Intensivkurs Biochemie. 1. Auflage, München: Urban & Fischer Verlag, 2005

Doenecke D., Koolman J., Fuchs G., Gerok W.: Karlsons Biochemie und Pathobiochemie. 15. Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005

Dose K.: Biochemie. Eine Einführung. 5. Auflage, Springer Verlag, Mainz 1996.

Dreesmann D.: Aber bitte mit Gentechnik? Gentechnisch hergestellte Enzyme als Helfer der Lebensmittelindurstrie. In: Praxis der Naturwissenschaften Biologie in der Schule, Heft 7, 61. Jahrgang 2012.

Ebner M.: Eignung von Branchenstrukturanalysen in schnell wachsenden Märkten am Beispiel der HIV-Medikamentenproduktion. Diplomarbeiten Agentur diplom.de, 2002

Graf E.: Fleckenentfernung durch Enzyme. In: Unterricht Biologie, 22. Jahrgang 1998, S.19-21

Grob P.: Unterrichtshilfen Naturwissenschaften. Einfache Schulversuche zur Lebensmittelchemie. 3.Auflage, Köln: Aulis Verlag Deubner, 2000

Grois G., Masin Chr., Pesek, P.: 4. VCÖ-Chemietage Salzburg 2014. Workshopunterlagen zu Experimente mit Hand, Herz und Hirn

Halmos P.: The Teaching of Problem Solving. The American Mathematical. Vol. 82, S. 466-476, 1975

Hassinger H., Wiebusch R-D.: Experimentelle Enzymologie. 1. Auflage, Diesterweg-Salle & Sauerländer, 1977.

Heimlich U., Wember F. B. (Hrsg.): Didaktik des Unterrichts im Förderschwerpunkt Lernen. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2007

Heller W., Naumer H., Knüttel A.: Enzyme und enzymatische Analyse. Impulse und Materialien für die kreative Unterrichtsgestaltung – Chemie. RAABE-ÖBV, Wien 1996, S. 4-31.

Horn F.: Biochemie des Menschen: Das Lehrbuch für das Medizinstudium. 5.Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2012

Horton H. R., Moran L.A., Scrimgenour K.G., et.al.: Biochemie. 4. Auflage, München: Pearson Studium, 2008

Hrsg: M. Mittelbach: Skriptum Organisch-chemische Schulversuche Laborübungen. Ausgabe 2013/14, S. 40

Hutterer R.: Fit in Biochemie: Das Prüfungstraining für Mediziner, Chemiker und Biologen. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010

Just M.: Chemische Schulexperimente Band 2. Organische Chemie. 1. Auflage, Volk und Wissen Verlag, Berlin: 1999

Keil M., Kremer B.P.: Wenn Monster munter werden: Einfache Experimente aus der Biologie. 1. Auflage, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003

Kircher E., Girwidz R., Häußler P.: Physikdidaktik. Eine Einführung. Berlin: Springer Verlag, 2001

Klieme E. et al.: Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Bonn: Bundeministerium für Bildung und Forschung, 2003

Kockert, K.-H.; Schalko, W. Workshopunterlagen „Antioxidantien“; 57. Fortbildungswoche „Plus lucis“ 2003

Koolman J., Meoller H., Röhm K-H.: Kaffee, Käse, Karies. Biochemie im Alltag. Weinheim, New York: Wiley-VCH-Verlag, 1998

Koolman J., Röhm K.: Taschenatlas Biochemie des Menschen. 4. Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 2009

Krause U-M.: Feedback und kooperatives Lernen. In: Rost, D.H. (Hrsg.): Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie. Münster: Waxmann-Verlag, 2007

Kreutzig T.: Kurzlehrbuch Biochemie. 12. Auflage, München: Urban & Fischer, 2006

Krömker V.: Kurzes Lehrbuch Milchkunde und Milchhygiene. Stuttgart: Enke – Verlag, 2006

Labudde P. (Hrsg.): Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1.-9. Schuljahr. 2. Auflage. Bern: Haupt-Verlag, 2013

Lösche K.: Enzyme in der Lebensmitteltechnologie. 1. Auflage, Hamburg: Behrs-Verlag, 2000

Lugitsch J.: Kompetenzen im experimentellen naturwissenschaftlichen Unterricht. Diplomarbeit. Graz, 2011

Lüllmann H., Mohr K., Hein L.: Pharmakologie und Toxikologie. 17. Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2010

Metzger S.: Lesekompetenz und deren schulische Förderung. Studienarbeit. Marburg, 2005

Müller-Esterl W.: Biochemie. Eine Einführung für Mediziner und Naturwissenschaftler. 2. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011

Munk K., et. al.: Taschenlehrbuch Biologie. Biochemie. Zellbiologie. Stuttgart: Thieme Verlag, 2008

Nelson D., Cox M.: Lehninger Biochemie. 4. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2011

Paechter M., u.a. (Hrsg.): Handbuch kompetenzorientierter Unterricht. Weinheim und Basel: Beltz Verlag, 2012

Pilz G.: Biotechnologie. Anwendung, Branchenentwicklung, Investitionschancen. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010

Präve P., Faust U., Sitting W., Sukatsch D.A.: Handbuch der Biotechnologie. 4. Auflage, München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1994

Programme for internal student assessment. Schülerleistungen im internationalen Vergleich. Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin, 2001

Rajendran N.: Kulinarische Biologie und Chemie. Geheimnisse im Kochtopf. 2. Auflage, Landau: Knecht Verlag, 2002

Reisse W.: Kompetenzorientierte Aufgabenentwicklung. Ein Lehrerhandbuch für die Sekundarstufen. Köln: AULIS Verlag Deubner, 2008

Remschmidt C.: Einsatz von Enzymen im experimentellen Schulunterricht. Diplomarbeit. S. 28-29, Graz: 2000

Richter G.: Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels. 6. Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 1998

Riedel E.: Allgemeine und anorganische Chemie. 10. Auflage, De Gruyter, Berlin 2010

Rikus U.: Carboanhydrase – Ein Enzym, viele Wirkungen. Unterrichtsmodell für die Sekundarstufe II (11.-13. Schülerjahrgang). In: Unterricht Biologie, Nr. 238, S.41-47

Roth D., Tribus O., Sommer K.: Fruchtsaft und Gummibärchen. Experimente zur enzymatischen Hydrolyse von Gelatine. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006.

Schecker H., Parchmann I.: Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 12. Jahrgang, 2006

Schlichter N., Terranova F.: Lesekompetenz und naturwissenschaftliche Kompetenz anhand PISA und TIMMS. Studienarbeit. Saarland, 2004

Schmid R.: Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik. WILEY-VCH – Verlag, Weinheim 2002.

Schmidkunz H., Pfeifer P., Sommer K.: Enzyme – Grundwissen im Überblick. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006, 2/06, S.8-11.

Schreiner C.: PISA 2006: Erste Ergebnisse: Naturwissenschaft – Lesen – Mathematik. Graz: Leykam, 2007

Schwedt G.: Experimente mit Supermarktprodukten. 3. Auflage, Wiley VCH Verlag, Weinheim 2009.

Schwedt G.: Experimente rund ums Kochen, Braten, Backen. 2. Auflage, Wiley VCH Verlag, Weinheim 2010.

Sommer K., Pfeifer P., Reiß J.: Praktische Alltagschemie. Aulis-Verlag, Köln 2011.

Sormann L.: Umsetzung von Kompetenzmodellen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Diplomarbeit, Graz, 2011

Stapf H.: Chemische Schulversuche. Teil 3. Organische Chemie. 3. Auflage, VEB Verl. Volk u. Wissen, Berlin: 1962.

Tröller E.: Die Ursache des Bitterwerdens von Milchprodukten bei Zusatz von frischer Ananas. In: UC 3 (1992) 14, S.44-45

Tschekan K.: Kompetenzorientiert unterrichten. Eine Didaktik. 3. Auflage, Berlin: Cornelsen Verlag, 2011

Voet D., Voet J.G., Pratt Ch.W.: Lehrbuch der Biochemie. 2. Auflage, WILEY-VCH-Verlag, Weinheim 2010.

Wagner G.: Waschmittel. Chemie, Umwelt, Nachhaltigkeit. 4. Auflage, Weinheim: Wiley – VCH Verlag, 2010

Weinert F.E.: Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F.E. (Hrsg.): Leistungsmessung in Schulen. Weinheim: Beltz, S. 17-31, 2001

Widhalm K.: Ernährungsmedizin. 3. Auflage, Wien: Deutscher Ärzte-Verlag, 2009

Wieczorek R., Sommer K.: Ein Enzym für Frische und Geschmeidigkeit. Schulversuche mit dem Enzym Invertase. In: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 17. Jahrgang 2006.

Wild A., Schmitt V.: Biochemische und physiologische Versuche mit Pflanzen. Für Studium und Unterricht im Fach Biologie. Berlin: Springer-Verlag, 2012

Zeitler S., Köller O., Tesch B.: Bildungsstandards und ihre Implikationen für Qualitätssicherung und Qualitätsentwicklung. In: Gehrmann A., Henricks U., Lüders

M. (Hrsg.): Bildungsstandards und Kompetenzmodelle. Beiträge zu einer aktuellen Diskussion über Schule, Lehrerbildung und Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, S. 23-36, 2010

29 Webverzeichnis

http://www.abc.berufsbildendeschulen.at/upload/1144_FSwB%20und%20HLW.pdf

(letzter Zugriff: 28.05.2014)

https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf

(letzter Zugriff: 13.05.2014)

https://www.bifie.at/system/files/dl/pisa12_zusammenfassung_ergebnisse_2013-12-03.pdf

(letzter Zugriff: 30.06.2014)

https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf

(letzter Zugriff: 03.07.2014)

http://www.biologieunterricht.info/pool/pic/einstieg_schwermetalle.jpg

(letzter Zugriff: 23.06.2014)

www.bs-wiki.de

(letzer Zugriff: 03.07.2014)

http://www.chemieunterricht.de/dc2/milch/lab.htm

(letzter Zugriff: 30.06.2014)

http://www.conatex.com/mediapool/versuchsanleitungen/VAD_Chemie_Milch-Kaese.pdf

(letzter Zugriff 16.06.2014)

daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de

(letzer Zugriff: 03.07.2014)

www.hlw.at/download/71/

(letzer Zugriff: 28.05.2014)

http://www.hlw-dl.at/cms/index.php/ausbildung/vital-neu

(letzer Zugriff: 28.05.2014)

http://www.literacy.at/fileadmin/literacy/redaktion/pdf/Theorie_ZieleStileStrategien.pdf

(letzter Zugriff: 26.05.2014)

http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=28895

(letzter Zugriff: 03.07.2014)

http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/biotechnologie/material_biotec/unterricht_praktikum_biotec/milch/kaeseherstellung/download/Kaeseherstellung.pdf

(letzter Zugriff: 30.06.2014)

http://www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzyme-explorer/analytical-enzymes/peroxidase-enzymes.html

(letzter Zugriff: 16.06.2014)

https://aeccc.univie.ac.at/projekte/bildungsstandards-8-schulstufe/

(letzter Zugriff: 30.06.2014)

http://de.wikipedia.org/wiki/Global_harmonisiertes_System_zur_Einstufung_und_Kennzeichnung_von_Chemikalien

(letzter Zugriff: 03.07.2014)