

**Die Entwicklung und Evaluation einer Lernumgebung,  
die der Konzeption Chemie im Kontext folgt.**

Eine zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Pädagogik**

dem Fachbereich Chemie der

Universität Dortmund

vorgelegte

**Dissertation**

von

Ingrid Hoffmann

Promoviert am 26. November 2003

1. Gutachter: Prof. Dr. B. Ralle

2. Gutachterin: Prof. Dr. I. Melle

Mein besonderer Dank gilt

Herrn Prof. Dr. Ralle für die interessante Themenstellung, für seine ständige Bereitschaft zur konstruktiven Diskussion und für seine vielfältigen Anregungen,

Frau Asendorf, Frau Adam, Herrn Heidborn und Herrn Pabst vom Studienseminar Göttingen für ihre hilfreichen Beobachtungen beim Concept-Mapping,

Herrn Reh von der Fa. Manet® für die Bereitstellung der software für das Concept-Mapping,

Herrn Prof. Dr. Haller für seine Unterstützung bei der statistischen Datenaufbereitung,

Herrn Kuessner und Herrn Wloka für die jeweilige Erprobung der Unterrichtseinheit,

Frau Dr. Gottschalk für die Hilfen bei der experimentellen Erschließung biochemischer Fachinhalte.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangssituation und Problemstellung	1
2.	Theoretische Modellannahmen	9
2.1	Die konstruktivistische Lerntheorie, ihre sozial – konstruktivistische Perspektive und eine Umsetzung im Chemieunterricht	.9
2.2	Die gedächtnistheoretische Variante der konstruktivistischen Auffassung	13
2.3	Der entwicklungs- und persönlichkeits-theoretische Forschungsansatz	14
3.	Der Lernzyklus - eine theoriegeleitete Unterrichtsorganisation	16
3.1	Basiskonzepte im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘	17
	• Das qualitative Konzept des Gleichgewichts	18
	• Messergebnisse, die das MWG bestätigen	18
	• Messergebnisse, die das MWG nicht bestätigen	20
	• Teilaspekte der verwendeten Basiskonzepte, die fehlen	21
	• Zusammenfassung	23
3.2	Vernetzungen und multiple Perspektiven	23
	• Der Kontextaspekt ‚Hyperventilation‘	23
	• Die unterschiedliche Wirkung der Carboanhydrase	24
	• Gleichgewichte im Blut	25
	• Die Kennlinie einer Infusionslösung	25
3.3	Der Lernzyklus - eine Kontextgestaltung	27
3.3.1	Der Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wird erzählt	27
3.3.2	Phänomene, Sachzusammenhänge, experimentelle Erschließung	30
	• Blackout	30
	• Taucherflöhe	34
	• Barotrauma	37
	• Atmen unter erhöhtem und erniedrigtem Druck	41
	• Blutpuffer – Möglichkeiten und Grenzen	46
	• Puffer im Vergleich	48
3.3.3	Abstraktion und Vernetzung	50
3.3.4	Anmerkungen zur Erprobung	54
3.3.5	Zusammenfassung	57

3.4	Der Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss‘	59
3.4.1	Basiskonzepte im Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss‘	59
	• Beiträge zum Struktur – Eigenschaft – Konzept	59
	• Beiträge zum Donator – Akzeptor – Konzept	60
	• Beiträge zum Energie – Entropie – Konzept	61
	• Beiträge zum Reaktionsgeschwindigkeit- Konzept	62
3.4.2	Kontextaspekte, fachliche Bausteine und Vernetzungen	70
3.4.3	Der Kontext ‚Mangel und Überfluss‘	71
3.4.4	Phänomene, Sachzusammenhänge, experimentelle Erschließung	74
	• Fett, Leidensdruck und Lebensgarant	74
	• Fettfallen	87
	• Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht	96
	• Eiweißmangel und Ödeme	104
	• Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe	111
	• Antioxidanzien	117
4.	Der Untersuchungsplan	133
4.1	Einbettung des Forschungsproblems in einen Bezugsrahmen	136
4.2	Die Erhebungsmethoden	138
4.3	Befragung mit Fragebögen	139
	• Antwortskala	139
	• Statistische, hypothesenprüfende Untersuchungen	139
4.3.1	Anforderungen der Befragung an klassische Gütekriterien	140
4.3.2	Befunde aus der Mittelwertanalyse	142
4.3.3	Befunde aus der Korrelationsanalyse	151
4.3.4	Befunde aus der Faktorenanalyse	154
4.3.5	Befunde zu Änderungseffekten	159
4.3.6	Zusammenfassung aller Ergebnisse aus der Befragung	165
4.3.7	Diskussion der Ergebnisse	167

4.4	Concept-Mapping als Wissensdiagnose	171
	• Anforderungen des Concept-Mappings an Gütekriterien der qualitativen Sozialforschung	173
	• Zusammenfassung	175
4.4.1	Die Aufgabenstellung im Concept-Map	175
	• Hyperventilation	175
	• Fachsystematischer Aspekt	176
	• Kognitive Lehrziele	177
4.4.2	Anpassung der Grundhypothesen	178
4.4.3	Gestaltung der Concept-Maps	179
	• mit dem Paper – and – pencil – Instrumentarium	181
	• mit dem softwareunterstützten Instrumentarium	184
4.4.4	Auswertung mit dem Paper – and – pencil – Instrumentarium	188
4.4.4.1	Datenaufbereitung des Expertenmaps	191
4.4.4.2	Datenaufbereitung eines Schülermaps als Beispiel	193
	• Datenaufbereitung 1	193
	• Datenaufbereitung 2	195
	• Datenaufbereitung 3	196
	• Datenaufbereitung 4	197
	• Zusammenfassung	199
4.4.4.3	Auswertung der Datenaufbereitung	200
	• Gruppe k1	200
	• Gruppe kg	203
	• Gruppe bz	203
	• Gruppe k2	205
	• Zusammenfassung	206
4.4.4.4	Defizite des Konzeptverständnisses	208
	• Beispiel 1	208
	• Beispiel 2	209
4.4.4.5	Reflexionen der Beobachter	212

4.4.5	Auswertung mit dem softwareunterstützten Instrumentarium	215
4.4.5.1	Softwareunterstützte Datenaufbereitung	218
4.4.5.2	Auswertung der Datenaufbereitung	220
4.4.5.3	Inhaltliche Datenaufbereitung und Auswertung	221
4.4.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Datenaufbereitungen	225
4.4.5.5	Bobachtungen von Lehrern und Einschätzungen von Schülern	227
4.4.6	Auswertung des Fragebogens zum Concept-Mapping	232
4.5	Leistungstest als Wissensdiagnose	240
5.	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	243
6.	Literaturverzeichnis	252

## 1. Ausgangssituation und Problemstellung

Die pädagogische Diskussion über Schule und Berufsbildung wird beherrscht von einem mit vielen Inhalten besetzten Begriff. Schlüsselqualifikation heißt das Zauberwort. Gemeint sind die immer wieder neu in den Mund genommenen Worte wie Sozialkompetenz, permanente Lernfähigkeit, Teamfähigkeit, Konfliktfähigkeit, Kreativität. Die unterschiedlichen Ausprägungen umschreiben ein Anforderungsprofil, das nicht nur Schüler sondern auch Lehrer mit einschließt.

Es war wie ein kleiner Paukenschlag, mit dem der zweitägige Kongress der Bertelsmann – Stiftung mit dem Thema ‚Ziele und Werte innovativer Schulen‘ im März 1998 endete. Im Rahmen des großen Abschlussplenums an der Universität Münster rissen sich Lehrer und Schüler die ‚*Münstersche Erklärung*‘ aus der Hand. Die ‚*Münstersche Erklärung*‘ dokumentiert eine Aufbruchstimmung. Ob Lernprozessorganisation, Evaluation, Schulprogramm, alles was die Reformdebatte prägt, wurde diskutiert und vorgestellt.

„Der Anstoß von oben ist als Impuls angekommen“ (FR 1998. Nr. 78, S6), so fasst ein Journalist die hitzigen Debatten und die atmosphärischen Grundstimmungen zusammen.

Versteht man unter Paradigma eine Leitidee oder ein Modell zur Bezeichnung oder Beschreibung eines Sachverhaltes bzw. einer Handlungsweise, so ist ein Paradigmenwechsel im Verständnis von Schule eingetreten. Das heute zu verwirklichende Paradigma versteht Schule als ein sich selbst entwickelndes und evaluierendes Lern- und Dienstleistungssystem, das sich am Bildungsauftrag der Schule orientiert, so wie es in §2 des NSchG (Claasen 1982, S.19) formuliert ist:

„Danach sollen die Schüler zunehmend selbständiger werden und lernen, ihre Fähigkeiten auch über die Schulzeit hinaus zu entwickeln. Emanzipation und Befähigung zur fortwährenden Weiterbildung stehen demnach am Ende eines erfolgreichen Schulbesuches.“

Sollen aber Lernprozesse gefördert werden, die Schüler befähigen, eigenverantwortlich ihre Ausbildung in die Hand zu nehmen, ist es nötig, eine Neuorientierung in der Schule zur Geltung zu bringen. Gefragt ist nicht mehr ein Schulverständnis, das ein Denken in gewohnten Ordnungen und vorgegebenen Wegen betont und alternative Lösungsmöglichkeiten außer Acht lässt. Gefordert wird vielmehr eine Unterrichtsorganisation, die Raum gibt für eigenverantwortliches Lernen im sozialen Austausch (Mandl et al. 1997 S. 169 – 178, Krapp 1999 S. 396).

Wenn nicht mehr Beschulung und Belehrung vorrangig sind, sondern eigenverantwortliches Aneignen von Wissen und Deuten in Gang gesetzt und gefördert werden soll, ändert sich damit auch die Lehrerrolle. Es geht nicht nur darum, dass der Lehrende elementare Wissensstrukturen identifiziert, um sie in ihrer Komplexität und in ihrem Schwierigkeitsgrad für die Lernenden angemessen zu reduzieren. Es geht auch darum, Lernprozesse zu initiieren, die zur selbständigen Wissenserschließung und Wissensaneignung führen.

Wie die Ergebnisse der TIMSS – Studie (Lehrke 1999 S. 8, zitiert bei Baumert et al. 1997) dokumentieren, liegen deutsche Schüler und Schülerinnen mit ihren Leistungen in den naturwissenschaftlichen Fächern nur im Mittelfeld. Beklagt wird insbesondere die mangelnde Transferleistung. Die relativen Stärken der deutschen Schülerinnen und Schüler liegen im Umgang mit Aufgaben, die elementare Fachkenntnisse verlangen. Schwächen werden insbesondere bei den Aufgaben sichtbar, die das selbständige Anwenden von Gelerntem und das flexible Umstrukturieren von Problemkonstellationen erfordern.

Bestätigt werden diese Untersuchungsergebnisse in der PISA – Studie 2000, die mit 15 – jährigen Schülern und Schülerinnen aus 32 Staaten durchgeführt wurde. Die naturwissenschaftlichen Leistungen deutscher Schülerinnen und Schüler liegen unterhalb des Durchschnitts der OECD – Staaten. Untersucht wurde nicht nur das Wissen der Schülerinnen und Schüler, sondern auch ihre Fähigkeit, dieses Wissen bei der Lösung lebensnaher Aufgaben anzuwenden. Die Schwierigkeiten, die deutsche Schülerinnen und Schüler in der Anwendung ihres Wissens haben, lassen spezielle Rückschlüsse auf eine notwendige Veränderung des naturwissenschaftlichen Unterrichts zu. Neu gefordert wird eine Unterrichtsorganisation, die problem- und anwendungsorientiert ist und die naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen angemessen berücksichtigt (Baumert et al. 2001 S. 243 - 245).

Seit dem schlechten Abschneiden deutscher Schüler in internationalen Schulleistungsvergleichen ist die Krise des deutschen Schulwesens in aller Munde. Das verwundert, denn die Defizite des naturwissenschaftlichen Unterrichts sind seit langem bekannt. Festgestellt wurden in den letzten zehn Jahren folgende Mängel:

- abnehmendes Interesse der Schülerinnen und Schüler am Fach Chemie (Schmidkunz 1995 S. 9-11, Christen 1997 S. 175 -180, Gräber 1992 S. 270, Woest 1997 S. 51, Krapp 1996 S. 61)
- unbefriedigende Lernerfolge beim Aufbau eines strukturierten Wissens (Baumert 1997, Heinecke 1997 S. 330)
- geringe Schulung von vernetztem Denken (Baumert 1997).

Als Gründe hierfür ergaben sich in verschiedenen Studien speziell für den Chemieunterricht:

- keine Alltagsorientierung im Chemieunterricht (Gräber 1992 S. 270)
- zu wenige fächerübergreifende Aspekte im Chemieunterricht (Baumert 1997)
- geringe Entwicklung eines positiven Fähigkeitsselbstkonzeptes<sup>1</sup> (Knapp 1996 S. 61)

Seit einigen Jahren wird im Rahmen der Konzeption *Chemie im Kontext* untersucht, ob durch eine andere Unterrichtsorganisation eine Verbesserung des Chemieunterrichts möglich wird.

---

<sup>1</sup> motivationaler Faktor nach Krapp

Ausgangspunkt für die Entwicklung von *Chemie im Kontext* waren oder sind die Hauptprobleme des Chemieunterrichts, die in den letzten 10 Jahren in umfangreichen Untersuchungen belegt worden sind. Ausgehend von den positiven Erfahrungen, die in Großbritannien mit dem *Salters Advanced Chemistry Project* (Pilling & Waddington 1997 S. 13-18) erzielt wurden, ist eine Konzeption entwickelt worden, die sich durch folgende Kriterien auszeichnet (Parchmann & Ralle 1998 S. 12, Huntemann et al. 1999 S. 191, Parchmann & Ralle 2000 S. 132, Parchmann & Ralle. 2001 S. 2-7):

- *Chemie im Kontext* knüpft an die Erlebniswelt des Lernenden an. Im Zentrum stehen aktuelle, alltagsbezogene Fragestellungen, die in ihrer komplexen Umgebung belassen werden. Die Kontexte sind so ausgewählt, dass die Fragen nur hinreichend zu beantworten sind, wenn fachwissenschaftliche Konzepte zur Erklärung herangezogen werden. Die Beiträge der Chemie als Wissenschaftsdisziplin werden in Form von Basiskonzepten einsichtig gemacht. Je nach Kontext ist der Zugriff auf die Basiskonzepte unterschiedlich. Eigenständiges Lernen im sozialen Austausch besitzt einen hohen Stellenwert.
- *Chemie im Kontext* beruht auf drei gleichwertigen Prinzipien. Dazu gehören die Kontextorientierung, die Basiskonzepte und die besondere Gestaltung der Lernumgebung. Das didaktische Kriterium, das den Unterrichtsinhalt bestimmt, ist die Kontextorientierung und damit die Lebensrelevanz. Sie ist nicht mehr der Fachrelevanz untergeordnet oder gleichgestellt, sondern sie gewinnt als didaktisches Entscheidungskriterium den vorrangigsten Stellenwert in der Kriterienhierarchie. Bisher war es im Rahmen der Fachdidaktik üblich, dass der lebensweltliche Bezug zwar gewünscht war, aber er diente nur dazu, die fachwissenschaftliche Bedeutung des Lerninhalts zu belegen. Im Rahmen der Neukonzeption verliert das didaktische Kriterium ‚Lebensrelevanz‘ seine Bedeutung als Begründungsinstanz für fachsystematische Inhalte. Vielmehr wird die Kontextorientierung zum entscheidenden Kriterium für die Auswahl der komplexen, fachübergreifenden Lerninhalte.
- Die Beiträge der Chemie als Wissenschaftsdisziplin werden in der Konzeption *Chemie im Kontext* anhand von Basiskonzepten geordnet und einsichtig gemacht. Die Basiskonzepte werden durch vielfältige Zugriffe auf verschiedene Kontexte schrittweise aufgebaut. Die im Zentrum stehenden authentischen Fragestellungen sprechen Wissensgebiete an, die Bausteine einer auch später verfügbaren fachwissenschaftlichen Wissensstruktur sind. Die Auswahl der Bausteine ist exemplarisch aber systematisch. Die fachwissenschaftlichen Inhalte der Kontexte greifen damit auf Strukturen zurück, die schon in vorangegangenen Kontexten angelegt worden sind und neu verankert werden können. Das Ziel ist, ein kontextunabhängiges Wissensfundament aufzubauen, was einerseits durch Förderung eines grundlegenden Konzeptverständnisses und andererseits durch horizontale und vertikale Verknüpfungen des Wissens eingelöst werden soll.

- Die Konzeption *Chemie im Kontext* gibt nicht nur Qualitätsmerkmale vor, die sich auf das Wissen beziehen, sondern fordert Rahmenbedingungen für den Lernprozess des eigenverantwortlich zu erwerbenden Wissens. Die Lehrkräfte sind gefordert, eine geeignete Lernumgebung zu schaffen, die Wissen erschließt und zur weiteren eigenständigen Erschließung von Wissen anregt. Damit geht eine Veränderung der Lehrerrolle einher. Im Vordergrund steht mehr die moderierend und beratende Funktion im Sinne einer sozialen Dienstleistung für Schüler und Schülerinnen, die sich am Bildungsauftrag der Schule orientiert. Das Handeln des Lehrers ist damit dem Ziel und dem Prozess unterstellt, die Lernenden in einen gewünschten, in den Bildungszielen formulierten Entwicklungs- und Kompetenzstand zu bringen.

Erreicht werden soll dabei eine Form des ganzheitlichen Lernens. Darunter ist ein Lernen zu verstehen,

- das zu Faktenlernen, also Wissen im engeren und herkömmlichen Sinn führt,
- das die emotionalen Dimensionen von Wissen pflegt,
- das handlungsorientiert ist,
- das zur positiven Neukonstruktion von Wissen und Erfahrung führt,
- das Transferleistungen fördert,
- das im sozialen Austausch stattfindet.

### ***Chemie im Kontext* – eine Antwort auf die Defizite des gegenwärtigen Chemieunterrichts**

Der problemorientierte Ansatz war das didaktische Prinzip, das seit zwanzig Jahren immer wieder neu für den naturwissenschaftlichen Unterricht gefordert wird. Problemorientiertes Arbeiten im fragend – entwickelnden Unterrichtsgespräch setzt in der Regel die vom Lehrer im Detail herausgearbeitete Problemstruktur voraus und erfordert eine enge Führung auf das zu lösende Problem hin. Sprunghafte Ideen, unsystematische Neugier oder problematische Lösungsvorschläge passen nicht in das künstlich errichtete Lerngebäude und werden leicht abgewehrt oder auf später verschoben. Effizient ist die Organisation des problemorientierten Unterrichts für Lernende, wenn die vom Lehrer aufbereitete Fragestellung sich widerstandslos in schülereigene Wissensstrukturen integrieren lässt. Um die Unterrichtspraxis nicht zu einem lehrergesteuerten Planspiel zu machen, bei dem Schüler, die von den Spielregeln abweichen, stören, gibt die Konzeption *Chemie im Kontext* eine methodische Gestaltung vor. Es handelt sich dabei um einen vierphasigen Lernzyklus.

In der *Begegnungsphase* werden die Schülerinnen und Schüler mit dem Thema vertraut gemacht und mit dem Neuen konfrontiert. Das führt zu Fragen, die eine schrittweise Klärung des Problems zulassen. An diese *Phase der Neugier und Planung* schließt sich die *Phase der Erarbeitung und Präsentation* an. Dafür muss eine passende Lernumgebung bereitgestellt werden, die von den

Lernenden ergänzt werden kann und soll. Der letzten Phase, der *Phase der Abstraktion und Vernetzung* kommt eine besondere Bedeutung in der Konzeption zu: Das erarbeitete Wissen soll in einem neuen Zusammenhang angewendet werden. Gefragt sind hier motivierende und sinnstiftende Zusammenhänge, die eine Selbsttätigkeit ermöglichen und durch einen adäquaten Schwierigkeitsgrad Erfolgserlebnisse gewährleisten. Durch geeignete Brückenaufgaben, die verschiedene Perspektiven des Wissens aufweisen, soll erreicht werden, dass letztendlich ein kontextunabhängiges fachsystematisches Basiswissen den Lernenden zur Verfügung steht.

Die Konzeption *Chemie im Kontext* ist eine Antwort auf die Defizite des gegenwärtigen Chemieunterrichts.

- Erarbeitet werden komplexe Ausgangsprobleme, die in der Lebenswelt verankert sind.
- Erklärt wird ein Phänomen mit adäquaten chemischen Konzepten, die dem Alltagswissen überlegen sind.
- Entwickelt werden Basiskonzepte, auf die je nach Kontext zurückgegriffen wird.
- Gefördert wird selbständiges und eigenverantwortliches Lernen.
- Aufgezeigt werden multiple Perspektiven der Lerninhalte.

### ***Neuere Ergebnisse aus der Lehr – und Lernforschung***

In der neueren Literatur sind unterschiedliche Forschungsansätze veröffentlicht, die nach den Bedingungen fragen, unter denen Lernen stattfindet (Arnold & Siebert 1999 S. 81 - 121, Duit 1996 S. 145 – 163, Engelkamp 1990 S. 75 – 112, von Glaserfeld 1994 S.17 - 42, Krapp 1999 S. 387 – 406, Mandl et al. 1997 S. 169 – S. 178, Voß 1999 S. 61ff). Je nach Perspektive werden Rahmenmodelle entwickelt, die Teilaspekte des Lehr – Lerngeschehens betrachten, die für den Lernerfolg relevant sind.

Die Konzeption *Chemie im Kontext* fußt auf einer Lerntheorie, die einer konstruktivistischen Position folgt. Danach wird Wissensaneignung vom Lernenden selbst konstruiert, d.h. Informationen werden wahrgenommen, in vorhandene Strukturen eingepasst, in ihrer Tauglichkeit überprüft und individuell je nach Befindlichkeit, Biographie und Vorwissen verarbeitet (Arnold & Siebert 1999 S. 119 - 125, Duit 1996 S. 145 – 163, von Glaserfeld 1994 S. 17 - 42, Stork 1995 S. 15 – 28, Voß 1999 S. 61ff).

Die sozial-konstruktivistische Perspektive des situierten Lernens (Mandl & Gruber 1997 S. 169 – 178) betont die Situationen, in denen Lernprozesse stattfinden. Lernen wird aus dieser Perspektive als ein Prozess gesehen, bei dem individuelle, biographisch bedingte Faktoren des Lernenden mit *situativen* Komponenten in Wechselwirkung stehen. Zu den *situativen* Komponenten, die genauer ins Auge gefasst werden, gehören die Interaktionen der Lernenden untereinander und die Prozesse

der Wissensvermittlung. Es wird angenommen, dass der Lernerfolg mit der Kontextualisierung des Lerninhalts und der besonderen Art der Lernumgebung zusammenhängt.

Aus konstruktivistischer Sicht werden Informationen dann effektiv zu Wissen verarbeitet, wenn sie relevant, nützlich, neu und anschlussfähig sind. Das Gedächtnis wird dabei nicht mehr vorrangig als Informationsspeicher gesehen, der nach Bedarf abgerufen wird. Erinnern ist etwas, was in der Gegenwart stattfindet. In der gegenwärtigen Situation wird das konstruiert, was in der Vergangenheit stattfand. Somit spiegeln Erinnerungen nicht die Erfahrungen der Vergangenheit wider, sondern sind oft Neuinterpretationen.

Nach der Gedächtnistheorie von Engelkamp (1990) sind die in der Lernphase gelegten Gedächtnisspuren der Zugang zur Erinnerung. Diese kontextspezifischen Spuren verweisen auf die Schemata der gespeicherten Informationen und erlauben somit eine Rekonstruktion. Dabei wird angenommen, dass entscheidend ist, wie gut verschiedene Gedächtnisspuren, die möglicherweise sogar auf ähnliche Inhalte verweisen, voneinander unterscheidbar sind. Die Unterscheidbarkeit der Gedächtnisspuren wird der Schlüssel zur Qualität der Behaltensleistung. Aus dieser kognitionswissenschaftlichen Perspektive ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Behaltensleistung, der Lernstrategie und den charakteristischen Merkmalen des Lerninhalts, die die Erinnerung erleichtern.

Der *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretische Forschungsansatz* (Krapp 1996 S. 48) stellt die Lernmotivierung in den Mittelpunkt des aktuellen Lehr – und Lerngeschehens. Die Art der Motivierung wird unterschiedlich eingeschätzt: Ob der Lerner sich eher intrinsisch oder extrinsisch motiviert fühlt, ist von der Lernerpersönlichkeit, von der Lernsituation, vom Lerninhalt und von der sozialen Umgebung während des Lernprozesses abhängig. Angenommen wird, dass der Lerninhalt bedeutsam eingeschätzt wird, wenn er Interesse beim Lernenden weckt. Das Interesse wird dabei als überdauernde Vorliebe gesehen, die sich entwicklungsbedingt durch aufeinanderbezogene Lernprozesse eingestellt hat. Die subjektive Erlebnisqualität während des Lernprozesses verweist auf die Art der Motivationsanreize. Sind diese eher intrinsisch orientiert, fühlt der Lerner sich engagiert, wissbegierig, selbstbestimmt, kompetent und im Lernprozess eingebunden. Extrinsische Motivationsanreize rufen eher eine gegenläufige Erlebnisqualität hervor. Befunde sprechen dafür (Schieferle & Schreyer 1994), dass der Lernerfolg von der Art der Motivierung abhängt. Die Untersuchungen bestätigen, dass intrinsisch Motivierte ein qualitativ besseres Lernergebnis erzielen als extrinsisch Motivierte. Das zeigte sich insbesondere dort, wo anspruchsvollere Kriterien des Lernerfolgs überprüft wurden (Benware & Deci 1984 S. 755 – 765, Deci 1992 S. 43 – 47).

Die Konzeption *Chemie im Kontext* ist eine theoriegeleitete Unterrichtsorganisation. Sie stützt sich auf verschiedene Aspekte moderner Lerntheorien.

### *Chemie im Kontext*

- knüpft an konkrete Ausgangsprobleme an,
- zeigt multiple Perspektiven auf,
- ist in den Erklärungen fachwissenschaftlich ausgerichtet,
- zeigt Bezüge zwischen Kontext und dem zu erarbeitenden fachlichen Inhalt auf,
- schließt an Bekanntem an und vernetzt mit anderen Inhalten,
- findet in einer Lernumgebung statt, die die Eigenständigkeit im sozialen Austausch fördert.

In der Literatur sind verschiedene Unterrichtseinheiten exemplarisch veröffentlicht (Huntemann & Parchmann 1998 S. 229 ff, Paschmann et al. 2000 S. 227 ff, Huntemann et al. 2000 S. 19 - 29, Huntemann et al. 2001 S. 15 - 21, Huntemann et al. 2001 S. 77 - 85, Hoffmann & Ralle 2001 S. 16 - 22, Parchmann et al. 2001 S. 2 - 7, Schmidt et al. 2003 S. 6-18).

Die Untersuchenden nehmen an, dass

- die Kontextualisierung des Lerninhalts,
- die Vernetzung der Kontextaspekte,
- die kontextbezogene Anwendung der Basiskonzepte und
- die besondere Lernumgebung

sowohl das Interesse der Lernenden am Fach Chemie erhöhen als auch deren Lernerfolg vergrößern.

### ***Das Ziel der vorliegenden Arbeit***

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Annahme zu überprüfen, ob im Kontext erarbeitetes und multiperspektivisch erworbenes Wissen zu einer größeren Akzeptanz und Behaltensleistung bei Lernenden führt. Untersucht werden soll auch, ob in den Untersuchungsgruppen Änderungseffekte in der Motivation, in der Medienkompetenz, in der Selbständigkeit und in der Akzeptanz der Lehrerrolle nachgewiesen werden können. Dieser Zielsetzung folgt die Arbeit mit folgendem Aufbau:

In Kapitel 2 werden Modelle und Befunde der aktuellen Lehr- und Lernforschung vorgestellt, die den theoretischen Rahmen für die Entwicklung und Evaluation eines Lernzyklus bilden. Erläutert werden drei Forschungsansätze, die unterschiedliche Aspekte des Lernens beleuchten. Je nach Blickwinkel wird der Wissenserwerb aus konstruktivistischer, kognitionspsychologischer oder motivationspsychologischer Sicht dargestellt.

Das dritte Kapitel beschreibt die Kontextgestaltungen der Lernzyklen ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ und ‚Mangel und Übermaß – fehlgeleitete Ernährung‘. Evaluiert wird der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘. Die Umsetzung der Befunde aus der aktuellen Lernforschung in eine Unterrichtsmethode, die der Konzeption *Chemie im Kontext* folgt, wird deutlich gemacht. Vernetzungen mit anderen Fachinhalten, die nach Annahmen aus lerntheoretischer Perspektive, neu erworbenes Wissen verfügbar und lebendig erhalten, werden aufgezeigt.

In Kapitel 4 wird die Untersuchung zur Akzeptanz des kontextualisierten Lernens dokumentiert. Ausgehend von der Hypothese, dass ein lebensweltlicher und in Alltagskontexten verankerter Unterricht sowie ein hohes Maß an Eigentätigkeit und eigenverantwortlichem Lernen als interessant und motivierend angesehen wird, findet zum Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ eine Befragung der Schüler und Schülerinnen statt. Es handelt sich dabei um eine Pre- und Postbefragung. Der Fragebogen I bezieht sich auf den Unterricht, der vor dem Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ lag, der Fragebogen II prüft die Akzeptanz des kontextualisierten Lernens ab.

Die Befunde aus der Fragebogenuntersuchung werden in zwei Gruppen aufgeteilt. Einerseits handelt es sich um statistische Beschreibungen der Stichprobe. Andererseits sind es statistische hypothesenprüfende Untersuchungen<sup>2</sup>, deren Interpretation aus dem Blickwinkel der Forschungsfrage erfolgt. Vorgenommen wird eine Korrelations- und eine Faktorenanalyse sowie ein Signifikanztest der Mittelwerte. Aus den Mittelwertsunterschieden beider Befragungen lassen sich Änderungseffekte erschließen, die eine Aussage zur Akzeptanz des kontextualisierten Lernens zulassen. Die Befunde aus der Korrelations- und Faktorenanalyse zeigen Zusammenhänge zwischen Merkmalen auf, die aus der entwicklungspsychologischen Forschungsperspektive interpretiert werden.

Des Weiteren werden zwei Fallstudien vorgestellt, bei denen die Behaltensleistung der Schüler überprüft wird, die den Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erarbeitet haben. Das Überprüfungsverfahren verlangt, dass die Probanden vorgegebene Begriffe netzartig miteinander verknüpfen und die Verknüpfungen benennen. Zur Absicherung der Ergebnisse dienen Schüleraussagen und Lehreraussagen in unterschiedlichen Film- und Tonaufnahmen. Überprüft werden soll auch, inwiefern das im Kontext erworbene Wissen dekontextualisiert wird und in einem neuen Zusammenhang angewendet werden kann. Die Auswertung eines Leistungstestes, der ein

---

<sup>2</sup> Hypothesenprüfende Untersuchungen testen Annahmen über beobachtete Variablenbeziehungen. Sie dienen darüber hinaus zur Prognose und Erklärung von Phänomenen. Im Unterschied zu deskriptiven Untersuchungen sind nach Bortz Vorkenntnisse nötig, die zu einer präzisen Formulierung der zu untersuchenden Hypothese führen (vgl. Bortz 1995 S. 459 ff).

halbes Jahr nach der Lernphase von den Probanden einer Gruppe geschrieben wurde, liegt in dieser Untersuchung vor.

Das abschließende 5. Kapitel fasst die Untersuchungsergebnisse zusammen. Es beschreibt den bisher erreichten Stand bezüglich der Einsatzmöglichkeiten des Evaluationsinstrumentariums und regt zukünftige konzeptuelle Weiterentwicklungen sowie empirische Untersuchungen an.

## **2 Theoretische Modellannahmen**

### **2.1 Die konstruktivistische Lerntheorie, ihre sozial – konstruktivistischen Perspektiven und ihre Umsetzung im Chemieunterricht**

#### ***Die konstruktivistische Lerntheorie***

Aus der Lehr – und Lernforschung ist seit den Achtziger Jahren bekannt, dass der Lernerfolg davon abhängig ist, inwieweit die neu zu erwerbenden Lerninhalte selbständig erworben worden sind und mit bereits vorhandenen kognitiven Strukturen vernetzt werden können (Aebli 1982). Aber nicht nur das Anknüpfen an Bekanntem scheint zum Lernerfolg zu verhelfen. Nach der konstruktivistischen Lerntheorie ist dem Vergessen der Kampf angesagt, wenn das zu erlernende Wissen in vorhandene kognitive Strukturen integriert werden kann und wenn es zusätzlich eine Bedeutung in der Lebenswelt des Lernenden besitzt. Das wiederum bedeutet für den Lernenden einen Kompetenzgewinn, der lebenspraktische Vorteile verspricht. Anders formuliert: Werden Inhalte präsentiert, die nur im Rahmen der Schule und der Fachwissenschaft eine Bedeutung haben, aber in der Lebenswelt der Schüler nicht mehr gefragt sind, dann werden diese Inhalte vom Lernenden kaum angenommen und das Lernangebot bleibt weitgehend folgenlos.

Der Urheber der konstruktivistischen Lerntheorie ist der Biologe und Psychologe Jean Piaget (1976). Nach seiner Auffassung ist der Lernprozess ein Anpassungsprozess an die umgebenden Bedingungen. Treten Störungen durch unbefriedigte Handlungsergebnisse oder nicht einzuordnende Interaktionen auf, so dass die biographisch bedingten kognitiven Strukturen des Lernenden nicht mehr passen, müssen die vorhandenen Strukturen modifiziert werden, um den Interaktionsprozess aufrecht zu erhalten. Der einzelne versucht nach diesem Lernmodell zunächst die neuen Erfahrungen in bereits vorhandene kognitive Strukturen einzufügen. Gelingt dies nicht, müssen bewährte internalisierte Schemata modifiziert werden, oder der Lernerfolg bleibt aus.

Grundlegend für derartige Lernprozesse ist also die Vorstellung, dass Organismen einen Zustand anstreben, den Piaget *Äquilibration* nennt und bei dem der Organismus im Einklang mit sich und seiner Umgebung steht. Piaget versteht darunter keinen statischen Zustand sondern eine Dynamik,

die von zwei Prozessen in Gang gehalten wird. Er nennt die beiden Prozesse *Akkomodation* und *Assimilation*. *Assimilation* meint die Integration der Außenwelt in ein im Menschen vorhandenes kognitives Schema. Darunter zu verstehen ist, dass die Wirklichkeit aus dem Blickwinkel wahrgenommen wird, der in ein vorhandenes Deutungsmuster passt. *Assimilation* erfolgt aber in der Regel nicht ohne *Akkomodation*. Wird unter *Assimilation* die subjektive Auswahl und Angleichung der Bedeutungselemente der Außenwelt an die vorhandenen kognitiven Strukturen verstanden, so ist unter *Akkomodation* die Präzisierung alter Strukturen und die damit verknüpfte Integration neuer Deutungsmuster zu verstehen, so dass die Bedingungen erreicht werden, die der Verträglichkeit mit der Umwelt zu gute kommen.

Lernen wird demnach durch unbefriedigende Handlungsergebnisse ausgelöst. Der Lernende versucht die neuen Erfahrungen in bereits vorhandene Strukturen einzufügen. Gelingt dies nicht, müssen die bewährten Schemata modifiziert werden.

„Jedes Schema ist das Ergebnis eines assimilierenden Tuns. Dieses hat die Eigenschaft, dass es das Neue in das Bekannte einverleibt (...). Doch jedes Assimilationsschema ist gezwungen, sich an Gegenstände anzupassen, auf die es sich bezieht. Andernfalls kann die Assimilation nur verformend sein (...). Es kann deshalb keine reine Assimilation geben“ (Piaget/Inhelder 1974 S. 38 zitiert bei Arnold 1999 S. 47).

### ***Die konstruktivistische Lerntheorie und ihre unterrichtlichen Aspekte***

Die konstruktivistische Lerntheorie fragt nicht nur nach der Qualität des zu erwerbenden Wissens, sondern widmet sich auch der Fragestellung, wie sich im Kopf des Lernenden Vorstellungen, Begriffe und Regeln bilden. Das gewohnte Lernmodell, das sich nach dem Erklärungsmuster ‚Input‘ - ‚Output‘ ausrichtet, unterstellt eine monokausale Ursache – Wirkungskette: Gelernt wird, was gelernt werden soll. Die Ergebnisse der modernen Unterrichtsforschung legen nahe, dass passives Aufnehmen und Abspeichern eines Lehrstoffes keine zutreffende Erklärung für das Lernen mehr sein kann (Stork 1995 S. 20 ff, Häußler et al. 1998, Duit 1996 S.146 ff). Dem einfachen Übertragen von Wissen steht entgegen, dass der Lernende den Daten, die er empfängt, eine Bedeutung verleiht, die wiederum aus dem Kontext seiner Vorstellungen erwächst. Die Art und Weise, welche Lerninhalte aufgenommen und verwertet werden, hängt von den Lebensverhältnissen, den Erwartungen, den Zukunftsperspektiven und nicht zuletzt von der individuellen Lerngeschichte ab. Ziehe formulierte diese Sichtweise treffend:

„Neues Wissen wird biographisch synthetisiert d.h. es wird an vorhandene Erfahrung angepasst, umgedeutet, zurückgewiesen oder auch als widerspenstig aufbewahrt“ (Ziehe 1982 S. 191).

Der konstruktivistische Ansatz geht beim Lernen von wechselseitigen Kopplungen von Wahrnehmen und Wissen aus. Das in der Biographie des einzelnen erworbene Wissen beeinflusst die Auswahl, die Steuerung und die Korrektur der neuen Lernangebote, bevor sie vom einzelnen internalisiert werden. Lernen ist offensichtlich keine Folge von Belehrungen, also kein linearer Prozess, bei dem die Ursache der Wirkung vorausgeht, sondern lässt sich als zirkulären Prozess

beschreiben, der die Wechselwirkungen und Vernetzungen betont (Arnold 1999 S. 31). Das Lernangebot wird nur dann individuell internalisiert, wenn es handlungsorientiert ist und die Lebensbedeutsamkeit für den Lernenden einsichtig ist. Im Lernprozess verändert sich dann die kognitive Struktur. Teile werden ergänzt und erweitert, andere möglicherweise grundlegend verändert und neu strukturiert.

In den letzten zehn Jahren hat sich in der deutschsprachigen Literatur zur naturwissenschaftlichen Unterrichtsforschung der Begriff Konzeptwechsel als Kennzeichen neuer konstruktivistisch orientierten Sichtweisen vom Lehren und Lernen durchgesetzt (Duit 1996 S. 146). Gemeint ist damit, dass Lernen zentraler naturwissenschaftlicher Prinzipien und deren Gesetzmäßigkeiten in aller Regel ‚Umlernen‘ bedeutet, da vorunterrichtliche Vorstellungen und naturwissenschaftliche Vorstellungen sich in wesentlichen Aspekten stark unterscheiden. Sie sind in unterschiedliche Zusammenhänge eingebettet, was zur Folge hat, dass mit dem Lernen naturwissenschaftlicher Prinzipien auch ein Wechsel der Rahmenvorstellungen einher gehen muss. Der Konzeptwechsel wird daher bestimmt von der kognitiven Sachstruktur des Lernenden und den naturwissenschaftlichen Prinzipien und ihren Gesetzmäßigkeiten, die es zu erlernen gilt.

Ansätze des Konzeptwechsels sind in der Regel in die konstruktivistische Sichtweise des Wissenserwerbs eingebettet. Es handelt sich dabei um keine einheitliche Theorie. Gemeinsam ist allen Ausprägungen der konstruktivistischen Sichtweise, dass der Wissenserwerb als aktive Konstruktion auf der Basis vorhandener kognitiver Strukturen gesehen wird. Diese Kernaussage haben Gerstenmaier und Mandl (1995) als moderaten Konstruktivismus bezeichnet.

### ***Situiertes Lernen – eine Variante der konstruktivistischen Lerntheorie***

Bei den bisher beschriebenen konstruktivistischen Aspekten des Lernens werden die individuellen Konstruktionsprozesse betont und die sozialen Aspekte des Wissenserwerbs eher vernachlässigt. Die sozial - konstruktivistische Perspektive des *situierten Lernens* fasst Wissen nicht nur als individuell gespeichertes Konstrukt auf, sondern auch als eine Ansammlung von Fakten und Regeln, die im sozialen Kontext vermittelt und erworben werden.

Mandl gibt folgende Charakterisierung der Grundidee *situierten* Lernens.

„... dass Wissen also nicht einfach transportiert, sondern vielmehr individuell konstruiert wird. Daher spielt die Situation, in der der Lernprozess stattfindet, eine zentrale Rolle. Das Gelernte kann keineswegs vom Akt des Lernens und von der Situation getrennt werden, in der gelernt wird.... Lernen ist also immer ein Prozess, in dem personeninterne Faktoren mit personenexternen, situativen Komponenten in Wechselbeziehung stehen. Trotz fehlender einheitlicher Definition von „Situation“ besteht Einigkeit darüber, dass mit dem Situationsbegriff nicht nur materielle Aspekte gemeint sind, sondern auch die soziale Umwelt des Lernenden und somit auch andere Personen. Daher spielen beim situiertem Lernen auch die Interaktionen zwischen Menschen sowie die historischen und kulturellen Kontexte, in die ihr Handeln eingebettet ist, eine besondere Rolle“ (Mandl et al 1995 S.5, 1997, S.168).

Eine Forderung, die sich aus der Charakterisierung des *situierten* Lernens ergibt, ist eine möglichst ähnliche Gestaltung der Lernsituation in der Schule und der Anwendungssituation im Berufs- und Alltagsleben. An die Gestaltung der Lernumgebung werden folgende Anforderungen gestellt:

Gefordert werden komplexe Ausgangsprobleme, die

- motivieren,
- authentisch sind,
- nicht auf einen Kontext fixiert bleiben,
- im sozialen Austausch erlernt werden (Mandl 1997 S. 168, S.171).

## **2.2 Die gedächtnistheoretische Variante der konstruktivistischen Auffassung**

Engelkamp (1990) nimmt an, dass das Behalten ein Nebenprodukt der kognitiven Prozesse ist, die bei der Informationsverarbeitung ablaufen. Dementsprechend sind es nicht die Intentionen, etwas zu behalten oder die unterschiedlichen Gedächtnisspeicher, die die Dauer oder die Qualität des Behaltens beeinflussen, sondern es sind die bei der Verarbeitung der Informationen ablaufenden Prozesse selbst. Sie hinterlassen nach Engelkamp spezifische Gedächtnisspuren, die dann beim Abrufen der Information aus dem Gedächtnis aktiviert werden und das Auffinden der gespeicherten Informationen erlauben. Engelkamp nimmt eine Analogie der Informationsverarbeitung zur Wahrnehmung an. Er geht von einem sensomotorischen Gedächtnissystem aus, in welches über verschiedene Sinneskanäle einlaufende Reize einer spezifischen Verarbeitung unterzogen werden. Auf einer abstrakteren Ebene baut auf dieses System ein weiteres Gedächtnissystem auf, welches Gedächtnisinformationen aufgrund ihrer Bedeutung repräsentiert. Er nennt es das konzeptuelle System. Dort werden einfache Konzepte verknüpft und zu bedeutungsvollen Netzwerken zusammengeschlossen. Nach Schnotz (1994) werden Konzepte in Propositionen und Propositionen in Schemata verknüpft, wobei sich die Schemata wiederum zu semantischen Netzwerken organisieren. Das gewünschte Lehrziel ‚vernetztes Wissen‘ lässt sich in diesem Gedächtnismodell als einen hohen Verknüpfungsgrad definieren, der das Netz der kognitiven Schemata kennzeichnet. Diese Schemata können dann einerseits Leerstellen beinhalten, die dann bei weiterem Lernanreiz ausgefüllt werden können, wenn die Reizvorlage unvollständig war. Andererseits können die Schemata überdauernde Einträge enthalten, die in der Lernbiographie des einzelnen entwickelt worden sind.

Erinnern stellt demnach die Rekonstruktion einer mentalen Repräsentation mittels kognitiver Schemata dar. Es wird angenommen, dass diese Gedächtnisspuren zeit - und interferenzbedingten Zerfallsprozessen unterworfen sind. Das Verstehen eines Sachinhalts bedeutet also in diesem Schema, dass man von einem verfügbaren Schematainventar ausgeht. Gesucht wird dabei jeweils die Schemakonfiguration, die am besten auf den Sachverhalt und damit auf den Lernanreiz passt. Sie gilt dann als beste Interpretation der angebotenen Daten. Es handelt sich dabei um einen *assimilativen* Prozess im Sinne Piagets.

Widersprechen über Gedächtnisspuren aktivierte, kooperierende Informationseinheiten eindeutig dem Informationsanreiz von außen und ist dieser Widerspruch nicht auflösbar, so können nach

Auffassung von Engelkamp adäquatere Strukturen geschaffen werden, die ein neues Schema bilden. Ausgegangen wird davon, dass die Informationen stets zusammen mit den Merkmalen des Kontextes, indem sie vorliegen, abgerufen werden.

Die Besetzung der Schemastellen mit spezifischen Informationen führt zur Modifikation der betreffenden Schemata, so dass die Leerstellen ausgeweitet werden. Diese Prozesse entsprechen den von Piaget geforderten *akkomodativen* Prozessen. Die konstruktivistische Auffassung, nach der Wissen kontextspezifisch aufgenommen wird und nach der im Lernkontext die Bedingungen vorgegeben sind, unter denen das Wissen angewendet werden kann, ist hier in ihrer gedächtnistheoretischen Variante dargestellt.

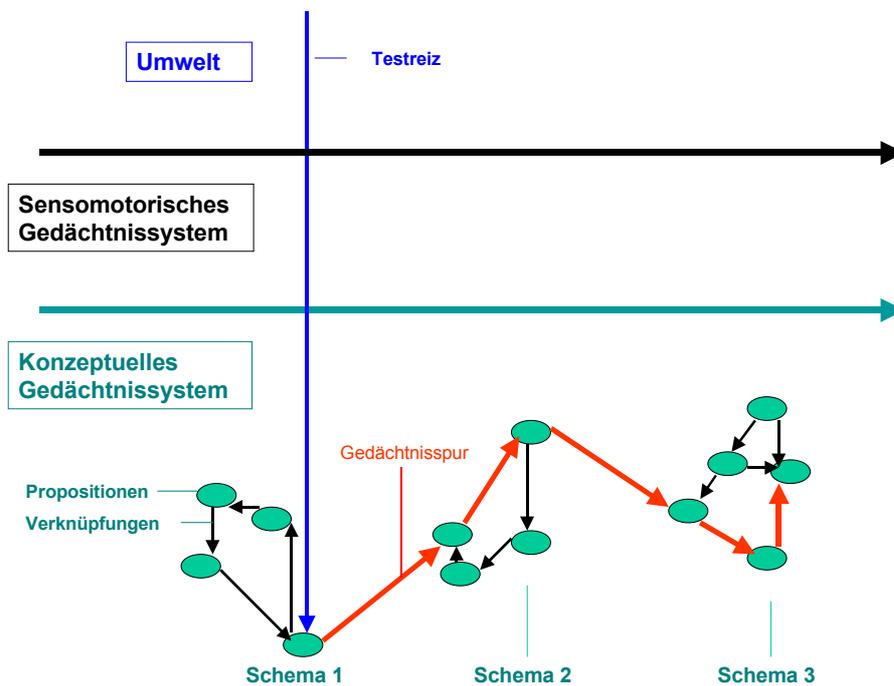


Abbildung 1: Erklärungsmodell nach Engelkamp (1997 S. 57) und Schnotz 1996 (S. 15 – 36)

### 2.3 Der entwicklungs- und persönlichkeits-theoretische Forschungsansatz

Die konstruktivistische Lerntheorie und ihre gedächtnistheoretische Variante befassen sich mit dem Aufbau von Wissensstrukturen und kognitiven Schemata. Das Ziel dieser Forschungsrichtungen ist letztlich, allgemeine Gesetzmäßigkeiten des Lernens zu ermitteln. Der entwicklungs- und persönlichkeits-theoretische Forschungsansatz (Krapp 1999 S. 402, Krapp 1996 S. 38 – 68) befasst sich weniger mit dem aktuellen Prozess des Lerngeschehens, sondern mit dem Endprodukt des Lernens, das an bewerteten Leistungen festgemacht werden kann.

Gefragt wird nach den Ursachen für das Zustandekommen von Leistungsunterschieden. Die Erklärungsversuche richten sich nicht in erster Linie auf die Ursachen und Bedingungen der Wissensaneignung. Sie richten sich auch nicht auf die für alle Lernenden gleichermaßen gültigen Gesetzmäßigkeiten. Die Forschungsperspektive richtet sich vielmehr auf die Herkunft der Leistungsunterschiede nach einer abgeschlossenen Lernphase. Ziel der Forschung ist es, Faktoren zu finden, die den Lernprozess bestimmen und das Lernergebnis deutlich beeinflussen. Krapp (1996 S. 48) schlägt ein Rahmenmodell vor, das die Lernmotivation in der Lernphase strukturiert. Welche Art von Motivierung ausgelöst wird, ob sich der Lernende eher intrinsisch oder extrinsisch motiviert fühlt, ob er sich selbstbestimmt wahrnimmt oder kontrolliert empfindet, das hängt von verschiedenen Einflüssen ab, die im Modell unterschiedlichen Bedingungsfeldern zugeordnet werden. Krapp nennt als Bedingungsfelder die Person des Lernenden, seine soziale Eingebundenheit in der Lernphase und die aktuelle Unterrichtsorganisation. Das Modell berücksichtigt neben den Faktoren, die die aktuelle Lernsituation bestimmen, ebenso überdauernde Faktoren im individuellen Lebenslauf. Gemeint sind Faktoren, die erklären, warum der Lernende bestimmte Vorlieben und Interessen zeigt. Das Entwicklungsgeschehen, das letztendlich zur Ausbildung von überdauernden Vorlieben führt, wird als formal aufeinander bezogene Lernprozesse betrachtet, wobei der Lerneffekt einer Lernphase sich auf die Lernmotivierung der nachfolgenden Lernphase potenziell auswirkt.

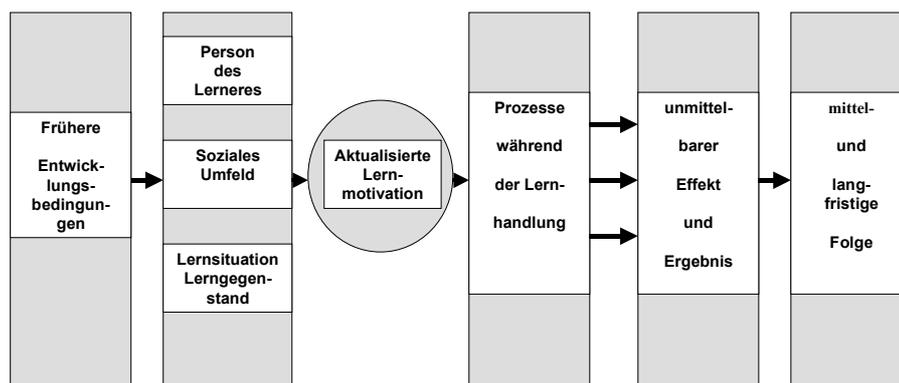


Abbildung 2: Rahmenmodell nach Krapp (1996 S. 48)

### 3. Der Lernzyklus - eine theoriegeleitete Unterrichtsorganisation

Eine methodische Unterrichtsstrategie, die sich aus der konstruktivistischen Lerntheorie entwickelt hat, ist der Lernzyklus. Der Lernzyklus besteht aus zeitlich aufeinander folgenden Phasen, deren Bedeutung unterschiedlich ist. Die Anzahl und die Benennung der Phasen variiert je nach Autor (Parchmann & Ralle et al. 2001 S. 2 - 7, Häußler et al. 1998 S. 217 ff). Nach Parchmann und Ralle (2001 S. 6) beginnt jeder Lernzyklus mit einer Phase, in der die Lernenden zunächst mit dem neuen Wissen vertraut gemacht werden sollen. Diese *Phase der Begegnung* ist vergleichbar mit einer *Störung* (Grzesik 1994 S. 219-222, v. Glaserfeld 1992 S. 33), die von außen induziert wird und die Aufmerksamkeit des einzelnen hervorruft. Unter *Störung* wird hier eine emotionale Befindlichkeit verstanden, die Irritation, Überraschung, Enttäuschung, Freude, Erstaunen, Ärger, Befremden, sein kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass, sobald etwas als störend gewichtet wird, auch die Bereitschaft vorhanden ist, der Störung entgegenzuwirken.

An die *Phase der Begegnung* knüpft sich die *Phase der Neugier und Planung* an. In dieser Sequenz wird das Neue des Phänomens thematisiert. Charakteristisch für diese Phase ist die sprachliche Umsetzung des ungewöhnlichen Blickwinkels, der durch die vorgestellten Phänomene hervorgerufen wird. Die im Konsens formulierten Fragen sind dann Ausgangspunkt für die Erklärung der Phänomene.

Nach der *Phase der Neugier und der Planung* schließt sich die *Phase der Erarbeitung und Präsentation* an. Die durch das Phänomen hervorgerufenen Denkanstöße werden in dieser Sequenz erklärt. Der Perspektivenwechsel, der mit dem Einstieg in die *Phase der Begegnung* verknüpft ist, wird in seiner sprachlich umgesetzten Form zum Ausgangspunkt selbständiger Aktivitäten. Die Unterrichtsorganisation erfolgt als Stationenarbeit, wobei entweder die Lernstationen von allen Schülergruppen nacheinander durchlaufen werden können oder jede Schülergruppe andere Lernstationen bearbeitet, so dass sich das gesamte Lernergebnis als Gemeinschaftsarbeit der Teilgruppen ergibt.

Soll Wissen in bestehende individuelle Strukturen vernetzt werden, müssen nach dem moderat konstruktivistischen Forschungsansatz adäquate Vorlagen vorhanden sein, die einen Einbau und Umbau des Lernangebotes zulassen. Gleichzeitig muss aber auch Raum gegeben werden, in dem eigenverantwortliches Lernen möglich wird (Mandl 1997 S. 171). Dabei ergibt sich der scheinbar unauflösbare Widerspruch jeder Erziehung zur Selbständigkeit: Die Unterrichtsorganisation setzt das voraus, was erst durch sie entwickelt werden kann. An dieser Stelle ist die Professionalität des Lehrers gefragt, der erkennt, welchen Freiraum er geben kann, in dem die Schüler den bisher erlangten Grad der Selbständigkeit überwinden können, um weitere Stufen der Autonomie zu erreichen.

Die letzte Phase des Lernzyklus ist die *Phase der Abstraktion und Vernetzung*. Das in der Erarbeitungsphase erworbene Wissen soll in einem neuen, motivierenden Zusammenhang angewendet und vernetzt werden. Der Anspruch leitet sich aus der Forschungshypothese der moderat konstruktivistischen Lerntheorie ab. Angenommen wird ein positiver Zusammenhang zwischen der Behaltensleistung und der besonderen Art des Einübens von neu erworbenem Wissen. Ist das erworbene Wissen in einem neuen Sachverhalt vertieft und mit verwandten Fragestellungen aus anderen Sachgebieten horizontal und vertikal vernetzt, wird vermutet, dass das hinzugewonnene Wissen auch auf längere Zeit verfügbar bleibt (Häußler et al. 1998 S. 214-217, Mandl et al. 1997 S. 170). Gefragt sind motivierende Aufgabenstellungen in *sinnstiftenden* Zusammenhängen, die eine Selbsttätigkeit ermöglichen und durch adäquaten Schwierigkeitsgrad, Erfolgserlebnisse bei den Lernenden gewährleisten.

### **3.1 Basiskonzepte im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘**

In der vorliegenden Untersuchung werden zwei Lernzyklen vorgestellt. Evaluiert wird der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘. ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ist ein Lernzyklus aus dem Bereich ‚Chemie im Menschen‘. Thematisiert werden Atemgasaufnahme und -abgabe sowie der Transport der Atemgase im menschlichen Körper. Angesprochen werden Gleichgewichte der unterschiedlichen Atemgase im Blut. Es handelt sich dabei um Fließgleichgewichte, die offene Systeme beschreiben. Im Gegensatz zu geschlossenen Systemen findet in offenen Systemen ein Stoffaustausch mit der Umgebung statt. So bleibt beispielsweise der Kohlenstoffdioxidgehalt im Blut konstant, solange die Geschwindigkeiten der CO<sub>2</sub> – Zufuhr aus der Zellatmung und der CO<sub>2</sub> – Abgabe beim Ventilieren konstant bleiben. Bleibt der gerichtete Kohlenstoffdioxid – Fluss erhalten, so bleiben auch die Oxoniumionenkonzentration und die Hydrogencarbonatkonzentration konstant, wenn die Geschwindigkeit ihrer Bildung gleich der ihrer Weiterreaktion ist. Dieser quasi stationäre Zustand ist ein scheinbares Gleichgewicht, das nur solange besteht, wie der gerichtete CO<sub>2</sub> – Fluss aufrechterhalten wird. Wird dieser abgestellt, stellt sich ein stabiles, chemisches Gleichgewicht ein, das geschlossene Systeme beschreibt und mit der Existenz lebender Systeme unvereinbar ist. Es wird angenommen, dass auch für das Fließgleichgewicht das Massenwirkungsgesetz gilt (Kleber & Schlee 1991 S. 22, Czihak et al. 1996 S. 63).

Die Basiskonzepte, die das Wissen der Fachdisziplin systematisieren und auf die im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zurückgegriffen wird, sind das *Gleichgewichtskonzept* und das *Donator – Akzeptor – Konzept* (Ralle & Parchmann 2001 S. 5). Die Protolyse der Kohlensäure ist exemplarisch ausgewählt zur Aufarbeitung von bekannten Fachinhalten und zur Weiterentwicklung ihrer qualitativen und quantitativen Aspekte. Da Protolysen in der Regel zu den Reaktionen gehören, die im Gleichgewicht enden, lassen sich das *Gleichgewichtskonzept* und das *Donator – Akzeptor – Konzept* nicht unabhängig voneinander darstellen. Sie ergänzen sich.

## **Das qualitative Konzept des chemischen Gleichgewichtes**

Ausgegangen wird von der Beschreibung verschiedener Atemgasgleichgewichte, die zunächst zu einem qualitativen Konzept des chemischen Gleichgewichtes führen, was sich wie folgt zusammenfassen lässt:

Wird die Stoffmenge einer Stoffkomponente im chemischen Gleichgewicht verändert, ermöglicht es die Systemeigenschaft eines Gleichgewichtes, der Änderung entgegen zu wirken. Da im Gleichgewicht zwei Reaktionen stattfinden, und die zweite Reaktion die Rückreaktion der ersten ist, kann die Störung kompensiert werden, wenn zunächst die Teilreaktion bevorzugt wird, die der Störung entgegenwirkt. In der Zeitfolge ändert sich die Bevorzugung einer Teilreaktion. Im Endzustand hat sich das Gleichgewicht wieder eingestellt. Hin- und Rückreaktion laufen erneut gleichberechtigt ab und keine Teilreaktion wird bevorzugt. Im Vergleich zu den Stoffmengen im Gleichgewicht vor der Störung hat sich das Verhältnis der Stoffmengen im sich neu eingestellten Gleichgewicht verändert, wobei die Größe der Änderung von dem Stoffmengenverhältnis abhängig ist, was vor der Störung vorlag. Bleiben die Bedingungen konstant, verändert sich die neueingestellte Anzahl der Teilchen nicht mehr, da keine der Teilreaktionen bevorzugt wird.

Für die Erklärung des Gleichgewichtes auf der Teilchenebene wird ein Modell verwendet, das dem in der Reaktionskinetik verwendeten ‚Kollisionsmodell‘ entspricht. Es handelt sich einerseits um ein einfaches Erklärungsmodell auf der Teilchenebene, das für die beobachteten Phänomene plausibel ist. Andererseits wird eine Deutung kinetischer Ergebnisse vorbereitet. Eine eindrucksvolle Visualisierung einer Gleichgewichtseinstellung nach einer Störung findet sich in dem von Krilla & Ralle (2001, Möllenkamp, Krilla & Ralle 2001 S. 224 – S. 229) entwickelten Programm.

## **Messergebnisse, die das Massenwirkungsgesetz bestätigen**

Im Rahmen des Kontextes ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wird auf zwei Gesetzmäßigkeiten zurückgegriffen, die das chemische Gleichgewicht quantitativ beschreiben. Einerseits das Henrysche Gesetz, andererseits das Massenwirkungsgesetz bzw. seine logarithmierte Form, die Henderson – Hasselbalch - Gleichung. Beide Gesetze werden zur Erklärung genutzt, aber nicht hergeleitet. Sie dienen im Rahmen dieses Lernzyklus als hilfreiche rechnerische Beschreibungsmodelle für Atemgas - Gleichgewichte. Die an Phänomenen erkannten Gleichgewichtsstörungen werden auf der Teilchenebene betrachtet, ihre Auswirkungen experimentell untersucht und rechnerisch bestätigt. Die Gleichgewichtsbetrachtungen werden genutzt, um die Gesetzmäßigkeiten, die für Gleichgewichte gültig sind, zu beschreiben. Bestätigt wird das Massenwirkungsgesetz durch folgende experimentelle Kontrollen:

1. Experimentell bestimmt wird der  $K_s$  – Wert des Kohlenstoffdioxid – Hydrogencarbonatgleichgewichtes (vgl. Paschmann 2001 S. 203)
2. Aufgenommen wird die Titrationskurve einer hydrogencarbonathaltigen Infusionslösung mit Salzsäure. Sie zeigt, dass die Protolyse der Kohlensäure dem Massenwirkungsgesetz folgt:  
Aus dem Volumen der Maßlösung und der Konzentration der Vorlage lässt sich der Anteil von Säureanion und korrespondierender Säure im sich jeweilig eingestellten Gleichgewicht bestimmen. Im gleichen Maß wie die

Stoffmenge von Hydrogencarbonat durch die zutitrierte Stoffmenge von Oxoniumionen reduziert wird, erhöht sich die Stoffmenge des gelösten Kohlenstoffdioxids, unabhängig davon, in welchem Verhältnis die Pufferkomponenten in der Vorlage vorgelegen haben. Der Unterschied zeigt sich in der Änderung des pH – Wertes. Die Gleichgewichtslage des sich neu einstellenden Gleichgewichtes nach einer Störung durch einen Säureeintrag lässt sich vorhersagen und der pH – Wert mit Hilfe der Henderson – Hasselbalchgleichung berechnen, wenn die Säurekonstante gegeben ist.

3. Auch das Wassergleichgewicht folgt dem Massenwirkungsgesetz. Ausgehend von der Tatsache,
- dass Wasser einen pH – Wert von 7 hat,
  - die Konzentration von Wasser 55,5 mol/L beträgt
  - und vereinfacht folgendes Gleichgewicht vorliegt  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH}^- + \text{H}^+$ , ergibt sich

$$K = \frac{c(\text{OH}^-) \cdot c(\text{H}^+)}{c(\text{H}_2\text{O})} = 10^{-15,75} \text{ mol/L und daraus folgt } K_w = 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{L}^2 .$$

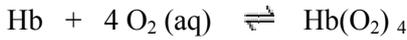
Im Gegensatz zu einem Kohlenstoffdioxid - Hydrogencarbonatgemisch ist jedoch Wasser ein denkbar schlechter Puffer. Das Stoffmengenverhältnis zwischen Hydroxidionen und Wassermolekülen, also von Pufferbase und Puffersäure, ist derartig unterschiedlich, dass nur geringfügig eingetragene Oxoniumionen durch Hydroxidionen abgefangen werden und zu Wassermolekülen reagieren. Diese geringfügige, nivellierende Wirkung der Vorlage ist nicht messbar.

4. Die nivellierende Wirkung von Pufferlösungen, zu denen kohlenstoffdioxid - und hydrogencarbonathaltige Lösungen gehören, sind ebenso mit quantitativen Gleichgewichtsbetrachtungen erklärbar.

Wie groß die jeweilige pH – Änderung ist, die sich nach Säureeintrag ergibt, hängt von dem Stoffmengenverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlensäure ab, das in der Lösung vorliegt, in die Säure zugegeben wird. Ändert sich der pH – Wert kaum, wird der Säureeintrag kompensiert, also abgepuffert. Unter Pufferkapazität einer Lösung versteht man diejenige Stoffmenge an Oxoniumionen bzw. Hydroxidionen, die zugegeben werden muss, um den pH – Wert einer Lösung um eine Einheit zu verändern (Atkins et al. 1998 S. 605). Je größer die Pufferkapazität ist, desto größer ist die Pufferwirkung der Lösung, also desto geringer die pH – Änderung nach Säurezugabe. Die Pufferkapazität beträgt 1, wenn der Zusatz von 1 mol Oxoniumionen zu 1 Liter Pufferlösung den pH – Wert um eine Einheit verschiebt (Beyermann 1993 S. 140). Hydrogencarbonat als Pufferkomponente bildet das Reservoir, das für die Abschwächung des sauren Eintrages verantwortlich ist. Dementsprechend vermindert gelöstes Kohlenstoffdioxid die Wirkung eines basischen Eintrages. Die Pufferkapazität ist besonders gering, wenn das Verhältnis der Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlenstoffdioxid kleiner als 0,1 und größer als 10 ist. Am unempfindlichsten ist der pH – Wert einer Pufferlösung gegen die Zugabe von Säure oder Base, wenn die Stoffmengen von gelöstem Kohlenstoffdioxid und Hydrogencarbonat gleich sind. Die Lösung hat demzufolge die größte Pufferkapazität, wenn das Stoffmengenverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlenstoffdioxid 1 beträgt.

### Messergebnisse, die das Massenwirkungsgesetz nicht bestätigen

Die Sauerstoffanlagerung an Hämoglobin folgt nicht dem Massenwirkungsgesetz. Diffundiert Sauerstoff aus den Lungenbläschen ins Blut und wird dort von Hämoglobin aufgenommen, so dass Oxihämoglobin entsteht, so liegen im Blut folgende Gleichgewichte vor:



Hb: Hämoglobin

Hb(O<sub>2</sub>)<sub>4</sub>: Oxihämoglobin

Für die Löslichkeit des Sauerstoffs gilt das Henry - Gesetz:

$$c_{(\text{O}_2)} = k_{\text{H}} \cdot p_{(\text{O}_2)}$$

Das Massenwirkungsgesetz für die Bildung von Oxihämoglobin lautet:

$$K_{(\text{MbO}_2)} = \frac{c_{(\text{Hb}(\text{O}_2)_4)}}{c_{(\text{Hb})} \cdot c_{(\text{O}_2)}^4}$$

$$c_{\text{O}_2}^4 = \frac{1}{K_{(\text{MbO}_2)}} \frac{c_{(\text{Hb}(\text{O}_2)_4)}}{c_{(\text{Hb})}}$$

Wird der Partialdruck des Sauerstoffs gemessen und der Stoffmengenanteil des mit Sauerstoff beladenen und des mit Sauerstoff unbeladenen Hämoglobins von der gesamten Stoffmenge des Hämoglobins angegeben, gilt (vgl. Lehninger et al. 1998 S. 211):

$$p_{\text{O}_2} = \frac{1}{K^*_{(\text{MbO}_2)}} \left[ \frac{\mathcal{G}_{(\text{Hb})}}{1 - \mathcal{G}_{(\text{Hb})}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Folgt das Gleichgewicht dem Massenwirkungsgesetz, müsste die Auftragung in einem  $\mathcal{G}$ - $p$ -Diagramm ebenfalls eine Hyperbel ergeben.

Wird der Anteil des Oxihämoglobins am gesamten Hämoglobin, wird also die Sättigung des Hämoglobins in Abhängigkeit zum Partialdruck des Sauerstoffs aufgetragen, so zeigt die experimentell ermittelte Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins einen s - förmigen Verlauf. Der Wendepunkt der Sauerstoffbindungskurve liegt bei 4 kPa und 50%igem Anteil von Oxihämoglobin. Im Intervall von 0 kPa – 4 kPa nimmt der Zuwachs zu, im Intervall von 4 kPa – 13 kPa ab (vgl. Lehninger et al. 1998 S. 210).

### ***Deutung der Abweichung***

Zu erwarten wäre ein hyperbelähnlicher Verlauf der Sättigungskurve, würde sich die graphische Darstellung nur aus dem mathematischen Zusammenhang erschließen, der sich aus dem Massenwirkungsgesetz ergibt. Der aus experimentellen Daten erhaltene s-förmige Verlauf der Bindungskurve wird damit gedeutet, dass die Sauerstoffmoleküle nicht gleichzeitig sondern nacheinander und unterschiedlich stark gebunden werden. Anders formuliert könnte das heißen: Je nach dem, ob Hämoglobin unbeladen ist oder ein, zwei, drei Sauerstoffmoleküle gebunden hat und dann mit einem weiteren Sauerstoffmolekül reagiert, handelt es sich um vier verschiedene Gleichgewichte mit entsprechend sich ändernden Gleichgewichtslagen. Angenommen wird in dieser Theorie, dass die Anlagerung des ersten Sauerstoffmoleküls an ein unbeladenes Hämoglobinmolekül ein Gleichgewicht ist, dessen Gleichgewichtskonstante deutlich kleiner ist als die Gleichgewichtskonstanten der Anlagerungen des zweiten, dritten und vierten Sauerstoffmoleküls an zunehmend beladene Hämoglobinmoleküle. Erklärt wird dies durch eine Strukturänderung an den unbesetzten Bindestellen am Hämoglobinmolekül, wenn das erste Sauerstoffmolekül angelagert ist. Die Strukturänderung wiederum bewirkt, dass im Gleichgewicht die Konzentration des beladenen Hämoglobins erhöht ist, also die Bindung des Sauerstoffs an die noch unbesetzten Stellen des Transportmoleküls erleichtert wird. In einer zweiten Deutung wird davon ausgegangen, dass Hämoglobin in zwei Zustandformen vorliegen kann. Bei der Anlagerung bzw. Abspaltung von Sauerstoff sollen sie durch Konformationsänderungen ineinander übergehen (vgl. Schmidt et al. 2000 S. 609).

### ***Physiologischer Vorteil der druckabhängigen Bindungsfähigkeit von Hämoglobin***

Arbeitet der Muskel, so beträgt der Partialdruck des Sauerstoffs etwa 1,5 kPa und das bedeutet, dass nur etwa 10% des Hämoglobins als Oxihämoglobin vorliegt. Ruht der Muskel, beträgt der Sauerstoffpartialdruck etwa 5 kPa und die Sättigung des Hämoglobins beträgt dementsprechend 75%. Hämoglobin ist also in der Lage Sauerstoff frei zu geben und dem Gewebe zur Verfügung zu stellen, wenn der Partialdruck von 5 kPa auf 1,5 kPa fällt. Darin liegt die physiologische Bedeutung der Bindungsfähigkeit des Hämoglobins an Sauerstoff in Abhängigkeit vom Partialdruck. Hämoglobin ist in der Lage, äußerst effektiv den Sauerstoff im Muskel und in andere Gewebe abzugeben. Wenn also das Blut die Muskelkapillaren durchfließt, wird Sauerstoff vom nahezu gesättigten Hämoglobin der Erythrozyten ins Blutplasma und von dort in die Muskelzellen frei gesetzt. Hämoglobin gibt beim Durchfließen der Muskelkapillaren etwa ein Drittel seines gebundenen Sauerstoffs ab.

### **Teilaspekte der verwendeten Basiskonzepte, die im untersuchten Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ fehlen:**

1. Nicht beantwortet werden häufig geäußerte Schülerfragen, die auf die thermodynamische Herleitung des Gleichgewichts verweisen:

- Warum laufen manche Reaktionen vollständig ab, andere bis zum Gleichgewicht?
- Warum kann das Gleichgewicht überhaupt ein Endzustand einer Reaktion sein?

Dass ein System im Gleichgewichtszustand sich auch im Zustand minimaler Gibbsenthalpie befindet, und die Gibbsenthalpieänderung immer kleiner als Null ist, ganz gleich, ob man sich von der Produkt - oder Eduktseite dem chemischen Gleichgewicht nähert, verweist auf energetische Betrachtungen im Rahmen einer allgemeingültigen Herleitung des Massenwirkungsgesetzes. Die Abhängigkeit der Gibbsenthalpieänderung von der Konzentration lässt sich im Rahmen einer thermodynamischen Herleitung in der Verallgemeinerung des Sonderfalles eines Konzentrationselementes entwickeln. Denn dort gilt:

$$G = 5,7 \lg \frac{c_2}{c_1} \text{ kJ/mol.}$$

Also gilt auch

$$G_2 - G_1 = 5,7 \lg c_2 - 5,7 \lg c_1 \text{ kJ/mol, d.h.}$$

$$G = \text{const.} + 5,7 \lg c \text{ kJ/mol.}$$

Wenn  $c = 1 \text{ mol/L}$  wird, ergibt sich für die Gibbsenthalpie  $G$  eine Konstante, die  $G^\circ$  sein muss.

$$\text{Also gilt: } G = G^\circ + 5,7 \lg c \text{ kJ/mol}$$

Die Anwendung auf die allgemeine Reaktion



$$G = \Delta G^\circ + 5,7 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \lg \frac{c_c^c \cdot c_D^d}{c_A^a \cdot c_B^b} \text{ und im Gleichgewicht mit } \Delta G = 0 \text{ ergibt sich das MWG}$$

$$\frac{c_c^c \cdot c_D^d}{c_A^a \cdot c_B^b} = 10^{\frac{-\Delta G^\circ}{5,7}} = K$$

Die thermodynamischen Herleitung des Massenwirkungsgesetzes verdeutlicht die Vernetzung des Gleichgewichtskonzeptes mit dem Energiekonzept, das ein weiteres Basiskonzept im Curriculum von *Chemie im Kontext* ist.

2. Beantwortet wird auch nicht die Frage, warum die Gleichgewichtskonstante stoffartspezifisch ist. Die Kollisionstheorie als Erklärungsmodell für den Gleichgewichtszustand ist hilfreich und notwendig aber mit Sicherheit nicht hinreichend. Nur von wahllosen Zusammenstößen der Teilchen pro Zeiteinheit auszugehen, erklärt noch nicht, dass im Gleichgewicht unterschiedliche Konzentrationen der Stoffkomponenten vorliegen. Hier wird die Verknüpfung mit dem *Reaktionsgeschwindigkeitskonzept*, einem weiteren Basiskonzept von *Chemie im Kontext*, deutlich. Bei der Einstellung des

Gleichgewichtes müssen die Kollisionen unterschiedlich erfolgreich sein. Die Konzentration, die jede Teilchensorte im Gleichgewichtszustand aufweist, hängt von den relativen Chancen ihrer Bildung und Weiterreaktion ab. Und diese Chancen werden zum einen bestimmt von der Anzahl der Kollisionen pro Zeiteinheit, aber auch von der Temperatur, den Orientierungserfordernissen und der nötigen Aktivierungsenergie. Substanzen, die schwer miteinander reagieren, häufen sich zwangsläufig an und erreichen damit die höchste Konzentration. Eine reaktionskinetische Herleitung des Massenwirkungsgesetzes am Beispiel einer Hin- und einer Rückreaktion, die beide dem Geschwindigkeitsgesetz zweiter Ordnung folgen, ermöglicht, die Konzentrationen im Gleichgewicht bei Versuchsbedingungen zu erfassen und damit die Gleichgewichtskonstante als Quotient zweier Geschwindigkeitskonstanten zu beschreiben. Wird zusätzlich die Geschwindigkeitskonstante bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht, ergibt die Darstellung des Logarithmus der Geschwindigkeitskonstanten in Abhängigkeit von den reziproken Werten der absoluten Temperatur eine Gerade. Damit lässt sich die Arrhenius – Gleichung erschließen, die die Geschwindigkeitskonstante quantitativ beschreibt und die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten  $K$  plausibel macht..

### **Zusammenfassung:**

Im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘

- wird das Massenwirkungsgesetz vorgestellt, aber nicht hergeleitet.
- werden Störungen der Gleichgewichte auf der Teilchenebene betrachtet, ihre Auswirkungen experimentell untersucht und rechnerisch bestätigt.
- werden die untersuchten Phänomene genutzt, um die Gesetzmäßigkeiten, die für Gleichgewichte gültig sind, zu bestätigen. Für die Löslichkeitsgleichgewichte sind dies das Henry – Gesetz und für die Kohlensäuregleichgewichte die Henderson - Hasselbalch - Gleichung.
- dienen das Massenwirkungsgesetz und seine logarithmierte Form als hilfreiche rechnerische Beschreibungsmodelle für Gleichgewichte. Sie werden nicht mit Hilfe experimenteller Daten hergeleitet.

## **3.2 Vernetzungen und multiple Perspektiven**

### **Der Kontextaspekt ‚Hyperventilation‘**

In drei Lernstationen (‚Blackout‘, ‚Atmen in großen Höhen‘ und ‚Blutpuffer – Möglichkeiten und Grenzen‘) wird der Kontextaspekt ‚Hyperventilation‘ aus verschiedenen Perspektiven untersucht.

Es handelt sich dabei um die Auswirkungen zweier sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte, dem Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und dem Kohlensäuregleichgewicht. Parameter, die die Lage der Gleichgewichte verändern, sind der  $\text{CO}_2$  – Partialdruck und der pH – Wert. Die Folgen werden experimentell untersucht. Sie dienen zur Erklärung der physiologischen Phänomene.

Hyperventilation ist ein Phänomen, das unter verschiedenen Bedingungen ausgelöst wird. Auf den Sauerstoffmangel in großen Höhen reagiert der Organismus mit einer schnellen und vertieften Atmung, so dass mehr Atemluft in die Lungen gelangt. Mit der Hyperventilation geht eine Erniedrigung des Kohlenstoffdioxidpartialdrucks durch den beim Ausatmen verstärkten  $\text{CO}_2$  – Export einher. Die Folge ist ein Oxoniumionenmangel und damit eine pH – Erhöhung in den Lungenkapillaren. Liegt der pH – Wert über 7,43, liegt eine *respiratorische Alkalose* vor. Der Körper kompensiert den erhöhten pH – Wert im Blut, indem er verstärkt Hydrogencarbonat in der Niere ausscheidet und damit die Rückresorption ins Blut vermindert. Liegt weniger Hydrogencarbonat im Blut vor, weil weniger rückresorbiert wird, kann weniger  $\text{CO}_2$  unter Oxoniumionenverbrauch nachgebildet werden, so dass der durch die Hyperventilation verursachte pH – Erhöhung entgegengewirkt wird.

Eine Hyperventilation kann auch bewusst ausgelöst werden, um damit die Tauchzeit zu verlängern. Die Erhöhung des pH – Wertes und die Erniedrigung des Kohlenstoffdioxidpartialdrucks beim verstärkten Ein- und Ausatmen werden von Chemorezeptoren wahrgenommen, die das Atemzentrum aktivieren. Da die Rezeptoren nur bei einem erhöhtem Kohlenstoffdioxidgehalt und einem verminderten pH – Wert im Blut ansprechen, flacht die Atmung nach einer Hyperventilation ab. Ist die Atemfrequenz zu gering, besteht das Risiko der Sauerstoffunterversorgung.

Eine Hyperventilation kann nicht nur Ursache sondern auch Folge einer pH – Änderung sein. Ist durch eine Stoffwechselanomalie der pH – Wert des Blutes erniedrigt, wird ein verstärkter Atemreiz ausgelöst, und der Betroffene hyperventiliert. Der Export von Kohlenstoffdioxid senkt die erhöhte Oxoniumionenkonzentration, da aus Hydrogencarbonat und Oxoniumionen Kohlenstoffdioxid und Wasser gebildet werden.

### **Die unterschiedlichen Wirkungen der Carboanhydrase**

Die Untersuchungen zur Carboanhydrase in der *Abstraktions- und Vernetzungsphase* vertiefen die Gleichgewichtsbetrachtungen zum Kohlensäuregleichgewicht im Sinne einer horizontalen Vernetzung. Die Säure – Base - Gleichgewichte und ihre Störungen, die das Phänomen der Hyperventilation erklären, werden unter dem fachlichen Blickwinkel des *Reaktionsgeschwindigkeitskonzepts* (vgl. Parchmann & Ralle 2001 S. 5) erweitert. Die Untersuchungen zur Carboanhydrase sind das Bindeglied zwischen dem *Akzeptor – Donatorkonzept*, dem *Gleichgewichtskonzept* und dem *Reaktionsgeschwindigkeitskonzept*. Durch

diese Brücke sind die Kontexte ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ und ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ miteinander verbunden. Die Carboanhydrase beschleunigt die Einstellung des Kohlensäuregleichgewichtes. Sie ist substratspezifisch für Kohlenstoffdioxid und Wasser bzw. für Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen, so dass die Hin- und die Rückreaktion im Kohlensäuregleichgewicht von ihr katalysiert wird.

Die besondere Wirkungsweise der Carboanhydrase verdeutlicht die Rolle der Niere im Rahmen der Kompensationsmaßnahmen des Körpers bei Störungen im Säure – Basehaushalt. Die Carboanhydrase in den Wandzellen der Nierenkanälchen ist dafür verantwortlich, dass Hydrogencarbonat aus dem Primärharn ins Blut rückresorbiert wird. Liegt eine Alkalose vor, so wie sie durch eine Hyperventilation ausgelöst werden kann, wirkt die pH – Erhöhung sich hemmend auf die Carboanhydraseaktivität aus. Hydrogencarbonat wird verstärkt ausgeschieden. Eine pH – Erniedrigung (Acidose) hingegen erhöht die Carboanhydraseaktivität, und Hydrogencarbonat wird in erhöhtem Maß ins Blut zurückgeführt.

### **Gleichgewichte im Blut**

Im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ werden die Löslichkeitsgleichgewichte der Atemgase und ihre Störungen beschrieben. Der Kontextaspekt ‚Taucherflöhe‘ führt zum Löslichkeitsgleichgewicht von Stickstoff. Das Löslichkeitsgleichgewicht von Stickstoff ist ein Gleichgewicht, das von zeitgleich vorliegenden Gleichgewichten eher unbeeinflusst ist. Druck- und Temperaturänderungen bestimmen die Gleichgewichtslage. Mathematisch beschrieben wird die Gleichgewichtslage durch das Gesetz von Henry.

Eine Gleichgewichtslage wird nicht nur als Ergebnis einer Druckänderung beschrieben, sondern auch als Endzustand einer Reaktion, die von zeitgleich vorliegenden Gleichgewichten beeinflusst wird. Das Löslichkeitsgleichgewicht von Sauerstoff und die Gleichgewichtsreaktion zwischen Hämoglobin und Sauerstoff zu oxigeniertem Hämoglobin sind zwei weitere Gleichgewichte, die durch Druckänderung gestört werden. Die beiden Gleichgewichte sind nicht voneinander isoliert aufzufassen, sondern liegen zeitgleich vor und beeinflussen sich gegenseitig. Genutzt wird diese Systemeigenschaft bei der Hyperbaren Sauerstofftherapie.

Das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und das Kohlensäuregleichgewicht sind ebenfalls zwei zeitgleich vorliegende Gleichgewichte, die sich wechselseitig beeinflussen. Störungen, die die Gleichgewichtslage verändern und physiologische Folgen nach sich ziehen, sind der reduzierte  $\text{CO}_2$  – Partialdruck beim verstärkten Ausatmen und der erniedrigte pH – Wert bei Stoffwechselanormalitäten.

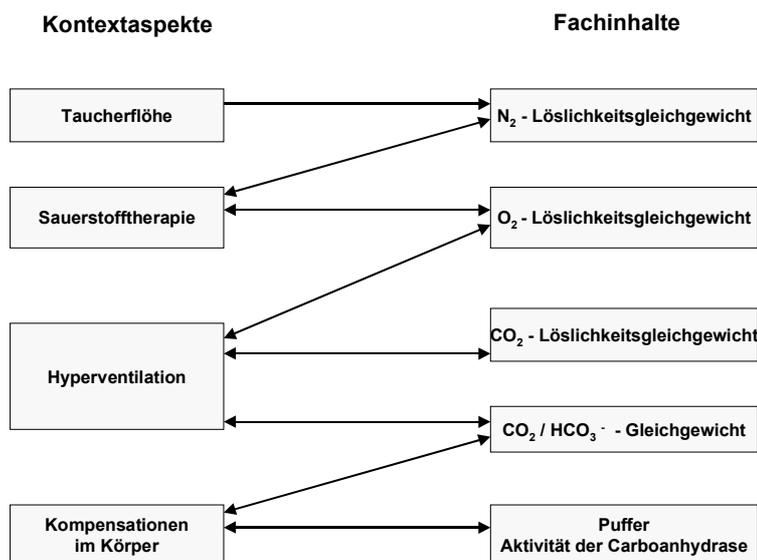
Für den deutlichen Unterschied in der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser und Blut ist die Aktivität der Carboanhydrase verantwortlich. Sie befindet sich in den Erythrozyten und sorgt für

eine beschleunigte  $\text{CO}_2$  – Abgabe aus den Lungenkapillaren in die Lungenbläschen und für eine beschleunigte  $\text{CO}_2$  – Aufnahme aus dem Gewebe in die Gewebekapillaren.

### Die Kennlinie einer Infusionslösung – ein Beispiel für eine horizontale Vernetzung fachliche Bausteine

Die Kennlinie der Infusionslösung, die bei einer potentiometrischen Titration erhalten wird, bietet vielfältige Möglichkeiten, Altbekanntes in Neuem wiederzufinden. Durch Säureeintrag nimmt die Konzentration von Hydrogencarbonat ab, die Konzentration der Kohlensäure und der Kohlenstoffdioxidgehalt nehmen zu. Dies ist die Erklärung für die Acidose, das tragende Phänomen in der Lernstation ‚Blutpuffer – Möglichkeiten und Grenzen‘.

Bekannt ist die wechselseitige Beeinflussung der Protolyse der Kohlensäure und des zeitgleich vorliegenden Löslichkeitsgleichgewichtes von Kohlenstoffdioxid. Neu sind die Darstellung der experimentellen Daten in einem pH – Wert –Volumen - Diagramm und die damit verknüpften quantitativen Aussagen: Je mehr die Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlensäure sich unterscheiden, desto stärker wirkt sich die gleiche Stoffportion der eingetragenen Säure auf den pH-Wert des sich neu einstellenden Gleichgewichtes aus. Die Stoffmenge von Hydrogencarbonat wird durch die eingetragene Stoffmenge der Oxoniumionen im gleichen Maße reduziert, wie die Stoffmenge der Kohlensäure zunimmt, und das ist unabhängig vom Stoffmengenverhältnis in der Vorlage, in die Salzsäure zugefügt wird. Die Summe der Stoffmenge von Hydrogencarbonat plus der Stoffmenge von Kohlensäure bleibt konstant, und das gilt sowohl für eine Pufferlösung, bei der die Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlensäure äquimolar sind, als auch für eine Pufferlösung, bei der sich die Stoffmengen von Puffersäure und Pufferbase unterscheiden.



### 3.3 Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ – eine Kontextgestaltung

#### 3.3.1 Der Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wird erzählt

Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ besteht aus sieben Lernstationen, die zur Erarbeitungsphase gehören. Erarbeitet wird ein komplexes Phänomen, das neu, ungewöhnlich und für den Lebenszusammenhang der Schüler bedeutsam ist. Atmen in großen Höhen und Atmen in extremen Tiefen, beides ist häufig verknüpft mit Beschwerden, die jeder an sich selbst beobachten kann, wenn er sich extremen Druckunterschieden aussetzt.

Erzählt werden Geschichten von Perлтаuchern im Pazifik, die in der Perlsaison mit einem Bleigewicht beschwert abtauchen. Erzählt wird auch von einer Höhenexpedition zum Mount Everest. Erziehungswissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass durch die Verankerung der Fachinhalte in Geschichten, die biographische Bezüge haben können und immer in der Lebenswelt verankert sind, positive Effekte auf das Lernen nachgewiesen werden können (Kubli 1998 S. 15, Zipes 1995, Berliner 1992 S. 143 – 163). Den Untersuchungen zufolge erhöht die Integration der Fachinhalte in interessante Stories die Behaltensleistung, wenn der narrative Rahmen eine allgemeine Erkenntnis am besonderen Fall illustriert.

*Erste Geschichte: Taravana (zusammengefasst nach Ehm 1991 S. 221-222)*

Noch heute dient bei den Perлтаuchern der Pazifik – Inselgruppe Tuamotu das Tauchen zum Lebenserwerb. In der Perlsaison, in der Austern wegen ihres Perlmutts gesammelt werden, lassen sich die Taucher mit einem Bleigewicht von 4-6 kg, das sie zwischen den Füßen halten, oft 20 – 45 m, zum Teil mit einer Geschwindigkeit von 80 – 100 m/min, nach unten ziehen.

Vor dem Tauchgang atmet jeder Perлтаucher einige Minuten lang verstärkt ein und aus, was von den Medizinern auch als Hyperventilieren bezeichnet wird. Am Gewässergrund sammeln die Perлтаucher während einer Zeit von 30 s – 60 s Austern, die in einen Korb gelegt werden. Korb und Bleigewicht werden vom Boot aus hochgezogen. Der Taucher zieht sich selbst an einer Leine, die am Boot hängt, zur Wasseroberfläche. Diese Tauchvorgänge dauern insgesamt 90 - 120 s. In einer Stunde wird sechs- bis fünfzehnmal abgetaucht und das etwa sechs Stunden am Tag.

Nach häufigen Tauchgängen stellen sich bei den Perлтаuchern eine Reihe von Beschwerden ein, die von den Eingeborenen als ‚Taravana‘ bezeichnet werden. Neben harmlosen Erscheinungen wie leichter Schwindel und Kopfschmerzen, kommt es auch zu Wahrnehmungsstörungen und Lähmungen. Berichtet wird, dass es an einem Tag bei 45 von 235 Tauchern zu Unfällen kam, von denen zwei tödlich waren. Bei drei Tauchern kam es zur Bewusstlosigkeit und bei sechs zu Lähmungen. Die restlichen klagten über Schwindel. Die meisten Unfälle traten gegen Ende des Taucheinsatzes auf, wenn die Taucher vom Perlwahn getrieben, immer öfter ohne wesentliche Pausen abtauchten. Angenommen wird, dass das Taravana – Phänomen durch Gasblasen verursacht ist.

Tauchunfälle treten bei den Tauchern der Tuamotu – Inseln auf, aber so gut wie gar nicht bei den Perлтаuchern der benachbarten Mangareva - Inseln. Die Perлтаucher der Mangareva – Inseln tauchen mit einer anderen Technik. Zum einen

hyperventilieren sie weniger und dann legen sie zwischen den Tauchgängen größere Pausen ein, so dass sie nicht mehr als vier Tauchabstiege pro Stunde ausführen.

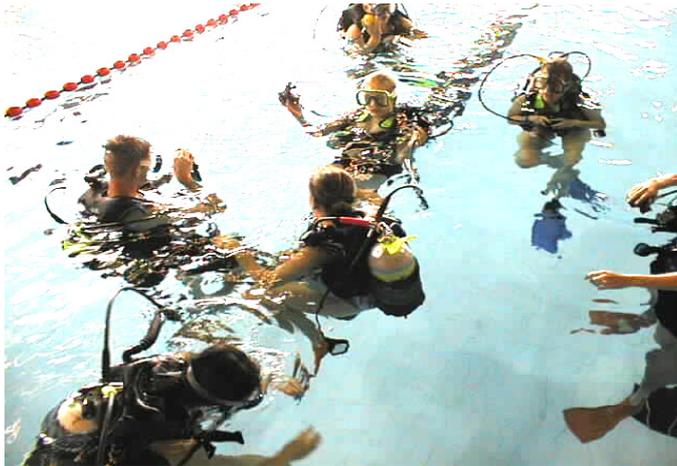
In einer zweiten Geschichte wird von der Simulation eines Gipfelsturms erzählt, die ein Forscherteam in einer Druckkammer durchführte, um sich für eine Mount Everest Expedition vorzubereiten. Bei einigen Teilnehmern stellten sich verschiedenartige körperliche Beschwerden ein, deren Ursachen unbekannt waren:

*Zweite Geschichte: Die Höhenkrankheit, ein bekanntes Phänomen im neuen Blickwinkel (zusammengefasst nach Houston 1999 S. 69 – 70, Krakauer 2000 S. 117, S. 151, S. 250 – 251).*

Zur Vorbereitung einer Mount Everest Expedition verbrachte ein Forscherteam 40 Tage in einer Stahlkammer, deren Druck allmählich auf die Werte des Everest – Gipfels vermindert wurde. Von den acht Männern des Teams simulierten fünf mehrmals den Gipfelsturm, nachdem sie zehn Tage lang unter Bedingungen gelebt hatten, die Höhen zwischen 7300 und 7600 Metern entsprachen. Zwei von ihnen waren extrem kurzatmig und klagten über Kopfschmerzen und Übelkeit. Ihr Zustand verbesserte sich erst, als sie die Druckkammer verließen. Ein Teammitglied erkrankte ernsthaft. Der Betroffene hatte zusätzlich zu seiner Kurzatmigkeit einen quälenden Husten mit blutverschmierten schaumigen Auswurf. Wie sich im nachhinein herausstellte, hatte sich Flüssigkeit in seinen beiden Lungenflügeln angesammelt.

### *Individuelle Erfahrungen*

Eigene Erfahrungen machten die Schülerinnen und Schüler der drei Untersuchungsgruppen - HOF, KSN, WLK - in einem Tauchkurs. Der Tauchkurs umfasste acht Doppelstunden. Unter der Anleitung des Tauchlehrers lernten die Schüler und Schülerinnen, ihre individuelle Tauchzeit zu steigern, indem sie die Technik kennenlernten, vor dem Tauchen verstärkt ein und auszuatmen. Sie schnorchelten und sie hatten die Gelegenheit mit Geräten zu tauchen. Für das Gerätetauchen standen Tauchausrüstungen zur Verfügung, so dass die Möglichkeit bestand, 10 Meter tief zu tauchen und sich in dieser Tiefe längere Zeit aufzuhalten. Schmerzhaftes Selbsterfahren mussten diejenigen beim Abstieg machen, denen der Druckausgleich nicht oder nur unzureichend gelang. Der längere Aufenthalt auf dem Schwimmbeckenboden wurde zu verschiedenen Schwimm- und Schwebübungen genutzt, die der Tauchlehrer vorführte und in einer speziellen Zeichensprache vermittelte. Eine besondere Aufmerksamkeit erregte das Phänomen, dass es nur mit äußerster Schwierigkeit gelang, unter Wasser einen Ballon aufzublasen.



**Abbildung 4: Der Tauchkurs**

Reaktionen am eigenen Körper erleben, Bedingungen für die individuelle, körperliche Leistungsfähigkeit zu spüren und die Freude an einer neu erlernten Technik sind Erfahrungen, die unter die Haut gehen und in der Erinnerung bleiben. Vergleichbare Rahmenbedingungen für eine Leistungssteigerung werden in der Lern – und Gedächtnisforschung favorisiert (vgl. Arnold & Siebert 1999 S. 109, Krapp 1996 S. 37 – 68). Erinnerung wird das, was mit Emotionen verbunden war, aber auch das, was mit einer Technik verknüpft war, die in der aktuellen Situation half, das Tauchvermögen und das Wohlbefinden zu verbessern. Diesen Zusammenhang zwischen subjektiv Erlebtem und der Behaltensleistung ist ein Untersuchungsaspekt in dieser Arbeit. Fragen, die sich in der Diskussion nach den Taucherfahrungen mit den Schülern und Schülerinnen gestellt haben und die sich als Leitfragen für die Lernstationen ergaben, sind folgende:

- Woher kommen die Beschwerden bei großen Tiefen und extremen Höhen?
- Warum sind die Beschwerden unterschiedlich?
- Welchen Einfluss hat die Tauchtiefe?
- Welchen Einfluss hat die Berghöhe?
- In welchem Zusammenhang stehen Atemgase und Beschwerden?
- Woher kommt die Gasblasenbildung?
- Wie sieht eine Therapie nach einem Tauchunfall aus?
- Wie wird die Höhenkrankheit therapiert?
- Warum treten keine Beschwerden auf, wenn der Taucher nicht hyperventiliert?
- Warum treten die Beschwerden in der Regel am Ende der Tauchgänge auf?
- Sind alle Atemgase beteiligt?
- Warum ist es so schmerzhaft, wenn der Druckausgleich nicht gelingt?

Den aufgeworfenen Fragestellungen konnten fünf Themengebieten zugeordnet werden:

- Die Auswirkung einer Druckänderung auf luftgefüllte Hohlräume wie Lunge und Ohr.
- Die Auswirkung einer Druckänderung auf die im Blut gelösten Atemgase.
- Die Folgen einer Hyperventilation
- und die Kompensationsmöglichkeiten im Blut,
- sowie die Standardtherapie nach einem Tauchunfall.

Die Aufarbeitung dieser Themengebiete erfolgte in sieben Lernstationen mit folgenden fachlichen Inhalten:

Lernstationen	Fachaspekte
Blackout	Die Folgen einer bewusst gesteuerten Hyperventilation.
Taucherflöhe	Die Auswirkung einer Druckänderung auf im Blut gelösten Stickstoff.
Barotrauma	Die Auswirkung einer Druckänderung auf luftgefüllte Hohlräume.
O <sub>2</sub> - Therapie nach einem Tauchunfall	Die Auswirkung einer Druckänderung auf im Blut gelösten Stickstoff und Sauerstoff.
Atmen in großen Höhen	Die Auswirkung einer Druckänderung auf den CO <sub>2</sub> - und O <sub>2</sub> – Gehalt im Blut.
Blutpuffer - Möglichkeiten und Grenzen	Kompensationsmöglichkeiten im Blut.
Puffer im Vergleich	Kompensationsmöglichkeiten im Blut.

### 3.3.2 Phänomene, Sachzusammenhänge und experimentelle Erschließung

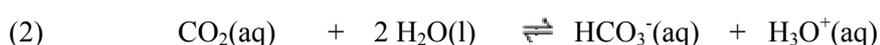
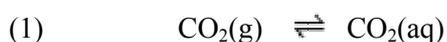
#### Blackout: Lernstation 1

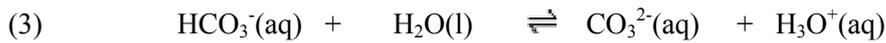
##### *Phänomen:*

Ein Schwimmer wird bewusstlos aus dem Schwimmbad gerettet. Bevor er den Wettkampf mit seinem Freund im Streckentauchen begann, hatte er etwa eine Minute lang verstärkt ein- und ausgeatmet, um seine Tauchzeit zu verlängern. Nach etwa 90 Sekunden Tauchzeit wurde er unter Wasser bewusstlos.

##### *Ursachen*

Wird vor dem Tauchen über längere Zeit schnell und tief durchgeatmet, ohne dass es der momentane Energiebedarf erfordert, so nennt man das Hyperventilation. Der Sauerstoffgehalt wird während dieses Vorganges nur unwesentlich erhöht. Da das Hämoglobin im arteriellen Blut bereits in Ruhe ohne vorausgegangene Hyperventilation zu 98% mit Sauerstoff gesättigt ist, macht sich der durch die Hyperventilation gestiegene Sauerstoffpartialdruck in den Lungenbläschen für die Dauer des bewussten Atemanhaltens kaum bemerkbar. Verantwortlich für das Herausögern des Atemreflexes ist eine Veränderung im Kohlenstoffdioxidgleichgewicht des Gewebes und des Blutes. Das arterielle Blut tritt mit einem Kohlenstoffdioxidpartialdruck von 5,3 kPa in die Gewebekapillaren ein. In den Zellen der Kapillarumgebung liegt infolge der ständigen Kohlenstoffdioxidproduktion ein höherer Partialdruck vor, so dass die physikalisch gelösten Kohlenstoffdioxidmoleküle im Konzentrationsgradienten vom Gewebe in die Kapillaren diffundieren. Im Gegensatz zum Wasser ist im Kapillarblut nur ein geringer Teil des Kohlenstoffdioxids physikalisch gelöst. Der überwiegende Teil reagiert im Blut weiter gemäß den Gleichungen (1) und (2). Gleichung (3) spielt im Blut keine wesentliche Rolle.





Bei einer Hyperventilation kommt es zu einer deutlichen Verschiebung dieser Gleichgewichte. Aufgrund des damit erreichten niedrigen Kohlenstoffdioxidpartialdruckes in den Lungenbläschen laufen die oben beschriebenen Prozesse bevorzugt in umgekehrter Richtung ab. Kohlenstoffdioxid wird verstärkt freigesetzt und kann daher ausgeatmet werden. Die reduzierte Konzentration von Kohlenstoffdioxid sowie die damit verknüpfte pH – Erhöhung wird als respiratorische Alkalose bezeichnet. Sie ist dafür verantwortlich, dass der Atemreiz zunächst fehlt und die Luft länger angehalten werden kann. Erst nach entsprechend langer Tauchzeit wird das Atemzentrum durch die langsam steigende Kohlenstoffdioxidkonzentration im Blut aktiviert. Die Hyperventilation bewirkt also das, was sich ein Streckentaucher wünscht, der ohne Atemgerät längere Zeit unter Wasser bleiben möchte. Die Tauchzeit kann bei geübten Tauchern in geringer Wassertiefe auf maximal 300 Sekunden verlängert werden. Allerdings ist die Verlängerung der Tauchzeit nicht risikolos. Die Gefahr besteht darin, dass der geringe Sauerstoffpartialdruck, der letztlich zur Bewusstlosigkeit führen kann, nicht früh genug bemerkt wird. Durch das verstärkte Ein - und Ausatmen beim Hyperventilieren vor dem Tauchgang hat der Taucher nicht das Bedürfnis zu atmen und bleibt länger unter Wasser als der sich einstellende Sauerstoffmangel es möglicherweise zulässt. Die Muskeltätigkeit beim Tauchen hat während des Tauchganges zu einer starken Abnahme des Sauerstoffpartialdruckes in den Lungenbläschen und im arteriellen Blut geführt. Da die Konzentration von Kohlenstoffdioxid zu gering ist, wird das Atemzentrum trotz Sauerstoffdefizit nicht angesprochen. Der Atem wird länger angehalten.

### ***Experimentelle Umsetzung***

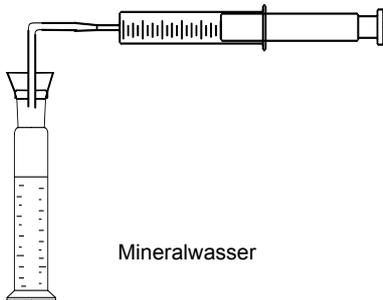
#### ***Versuch 1: Die Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid (Anhang S. L 6)***

##### **Variante a**

Geräte und Chemikalien: Waschflasche, Kolbenprober, Verbindungsschlauch, Stativmaterial, nicht mehr perlendes Mineralwasser.

Durchführung: In eine Waschflasche werden 20 mL nicht perlendes Mineralwasser gefüllt und ein Kolbenprober angeschlossen. Der Stempel des Kolbenprobers wird nun herausgezogen, in dieser Stellung kurz gehalten und anschließend erneut hineingedrückt und festgehalten.

Ergebnis: Wird der Gasdruck in der Saugflasche durch Herausziehen des Kolbens erniedrigt, setzt die Gasblasenentwicklung ein. Die Löslichkeit des Gases in der Flüssigkeit wird reduziert und das Gas perlt aus. Umgekehrt stoppt die Gasblasenentwicklung, wenn im System ein Überdruck erzeugt wird.



**Abbildung 5: Die Abhängigkeit der Löslichkeit von CO<sub>2</sub> vom Druck**

### **Variante b**

Geräte und Chemikalien: Kolbenprober mit Hahn, Universalindikator pH = 5 (Merck Nr. 6130)  
Kohlenstoffdioxid, Becherglas, 1 mL – Pipette

Durchführung: 100 mL Leitungswasser werden mit 1 mL Indikatorlösung gemischt. Die Farbe der Lösung sollte deutlich grün gefärbt sein. 20 mL dieser Lösung werden in den Kolbenprober gezogen und anschließend mit ca. 30 mL Kohlenstoffdioxid angereichert. Anschließend schüttelt man den Kolbenprober bei geschlossenem Hahn und drückt dabei den Stempel kräftig ein. Dann wird der Stempel so weit zurückgezogen, dass ein Unterdruck entsteht.

Beobachtung: Bei Druckerhöhung färbt sich die Indikatorlösung rot. Wird der Druck vermindert, stellt sich wieder eine Grünfärbung ein. Gleichzeitig kommt es zur Gasblasenentwicklung.

Deutung: Durch Druckerhöhung erhöht sich die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid, der pH – Wert sinkt. Wird der Druck erniedrigt, nimmt die Löslichkeit ebenfalls ab und der pH – Wert steigt.

### **Versuch 2: Die Simulation des „Ausatmens“ von Kohlenstoffdioxid (Anhang S. L 7)**

Geräte und Chemikalien: 3 Waschflaschen, Universalindikatorlösung pH = 5 (Merck Nr. 6130), stilles Wasser, Wasserstrahlpumpe

Durchführung: In jede Waschflasche werden ca. 30 mL nicht perlendes (stilles)Mineralwasser sowie 1 mL Indikatorlösung gegeben. Die Flaschen werden in Reihe verbunden. Nun zieht man Hilfe der Wasserstrahlpumpe Luft durch die Lösungen.

Beobachtung: Das Mineralwasser ist rot gefärbt. Wird die Wasserstrahlpumpe angestellt, färbt sich die Lösung in der ersten Waschflasche nach ca. 2 Minuten grün, nach weiteren 30 bzw. 60

Sekunden erfolgen die Farbumschläge in den beiden nachfolgenden, in Reihe geschalteten Waschflaschen.

Deutung: Die einzelnen Flaschen simulieren dabei die verschiedenen Bereiche des Körpers (Lungenalveolen, Kapillaren, Körperzellen). Der größte Partialdruckunterschied wird in der Lunge erzeugt, wenn hyperventiliert wird. Die dadurch induzierten Veränderungen in den systemisch verknüpften Kohlensäuregleichgewichten in Kapillaren und Gewebezellen erfolgen in gewissen zeitlichen Verzögerungen.

## **Taucherflöhe: Lernstation 2**

### *Phänomen*

Vom Himmel senkte sich der Rettungshubschrauber. Eine Stunde vorher war der Taucher ohne Beschwerden von seinem zweiten Tauchgang an diesem Tag zurückgekehrt. Eine halbe Stunde später bekam der Mann Kopfschmerzen, er konnte nicht mehr normal gehen, ihm wurde schwindelig und seine Haut begann zu jucken. Sein Blickfeld engte sich ein, ihm wurde übel. Er vermochte nicht mehr zusammenhängend zu denken und war orientierungslos. Mit Hilfe genauerer Untersuchungen konnten im Gehirn Stickstoffblasen nachgewiesen werden, die offensichtlich über den venösen Blutkreislauf eingeschwemmt wurden.

### *Ursachen*

Unter dem Begriff „Dekompressionskrankheit“ oder „Caisson – Krankheit“ sind Erscheinungen zusammengefasst, die durch das Ausperlen von Stickstoff in den Körpergeweben und im Blut verursacht werden.

An der Wasseroberfläche beträgt der Partialdruck von Stickstoff 0,78 bar (78 hPa) und von Kohlenstoffdioxid 0,0003 bar (0,03 hPa). Beim Tauchen mit einem Presseluftgerät wird die Lunge nicht nur an der Wasseroberfläche normal mit Luft gefüllt sondern auch unter Wasser. Dabei wird über die ventilgesteuerten Druckregler sichergestellt, dass der Druck der Pressluft jeweils dem herrschenden Wasserdruck angepasst wird. Auf diese Weise werden unphysiologische Druckdifferenzen zwischen Lungeninnenraum und Blutbahn vermieden.

In 10 m Wassertiefe wirkt auf den Taucher ein Gesamtdruck von etwa 2 bar ein. Er setzt sich zusammen aus dem Druck der Wassersäule und dem atmosphärischen Druck. Daher befindet sich etwa doppelt so viel Luftmasse in der Lunge, wie dies bei gleicher Atemlage an der Oberfläche entspräche. In dieser Wassertiefe beträgt dann der Partialdruck von Stickstoff 1,56 bar (156 kPa) und von Kohlenstoffdioxid in der Lunge 0,006 bar (0,06 kPa). Während des Abstieges und des Aufenthaltes eines Presslufttauchers in der Tiefe sättigen sich die Körpergewebe mit den Atemgasen entsprechend der jeweilig erhöhten Partialdrucke. Dabei löst sich der Stickstoff sechsmal besser im Fettgewebe als im Blut. Da er im Vergleich zu Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid im Organismus weder gebunden noch verbraucht wird, kann er ausschließlich nur über das Gefäßsystem abtransportiert und über die Lungen abgeatmet werden. Taucht ein Presslufttaucher zu schnell auf, ändert sich in kurzer Zeit der äußere Druck und damit auch der Partialdruck des Stickstoffs. Reduziert sich der Partialdruck auf die Hälfte, vermindert sich ebenso die Löslichkeit des Stickstoffs und es bilden sich größere Gasblasen, die abgeatmet werden müssen.

Solange der Druck der im Gewebe gelösten Gase höher ist als der äußere Druck, das Gewebe also übersättigt ist, bleibt die Gasblasenentwicklung erhalten. Sie hört erst auf, wenn ein Gleichgewicht

erreicht, bei dem im Gleichgewichtszustand die Konzentration des Gases in dem betrachteten Gewebe reduziert ist und der Umgebung entspricht. Die Einstellung des Gleichgewichtes wiederum erfolgt je nach Gewebeart mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Die Entbindung des Stickstoffs aus dem Fettgewebe beispielsweise kann mehrere Stunden dauern.

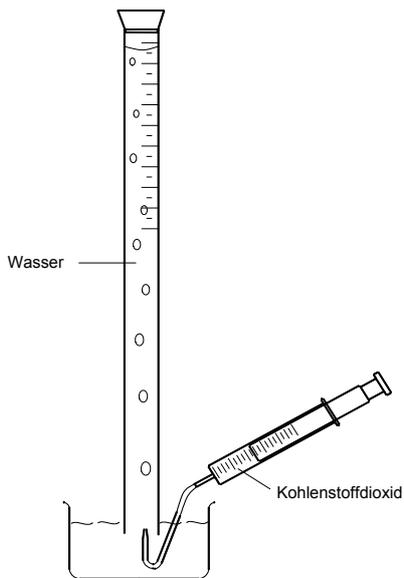
Bei der leichteren Form der Dekompressionskrankheit findet die Stickstoffblasenbildung vorwiegend in der Haut, der Muskulatur und in den Gelenken statt. Diese Gewebe zeichnen sich durch eine geringe Durchblutung aus, was die Entsättigung und damit die Einstellung des Löslichkeitsgleichgewichtes verzögert. Das Jucken und Kribbeln der Haut – auch „Taucherflöhe“ genannt - wird durch Stickstoffbläschen in den Hautgefäßen hervorgerufen, wobei besonders die Haut unterhalb des Schultergürtels und im Bauchbereich befallen ist. Treten Gelenkschmerzen auf, so sind Gasblasen in den Gelenken die Verursacher. Die angloamerikanische Bezeichnung ‚bends‘ für die Symptome der Taucherkrankheit leitet sich von der leicht vorgebeugten, affektiert erscheinenden Haltung ab, wie sie als ‚Grecian Bends‘ bei den Damen der viktorianischen Zeit modisch war. Vermutlich werden die Gliederschmerzen von Gasblasen verursacht, die in den Gewebetaschen um die Gelenke herum entstehen, das Gewebe überdehnen und damit die Nervenendigungen reizen (vgl. Moon, Vann & Benett 1995 S. 78).

Handelt es sich um einen schweren Dekompressionsunfall, so zeigen sich Symptome, die auf nervöse Ausfälle schließen lassen. Ansammlungen von Stickstoffblasen im Gehirn und Rückenmark führen zu Seh- und Hörstörungen sowie zu Lähmungserscheinungen. Ein sinnvoller Ansatz zur Risikominimierung ist, die Stickstoffblasenbildung zu vermindern. Ein langsames Auftauchen zur Oberfläche mit Zwischenstopps reduziert die Blasenbildung und damit den Gasübertritt ins venöse Blut. Die Stickstoffanreicherung im venösen Blut ist hauptverantwortlich für die Gasblasenansammlung im Gehirn und im Rückenmark. In speziellen Atemgasmischungen wird Stickstoff durch Helium ersetzt, da Helium eine wesentlich geringere Löslichkeit im Blut aufweist.

### ***Experimentelle Umsetzung***

***Versuch 3: Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid und Stickstoff (verändert nach Paschmann 2000 S. 85 – 86, vgl. Anhang S. 14)***

Geräte und Chemikalien: Plastikschauch (Länge 2 m, Durchmesser 2,6 cm), Kolbenprober, Schlauch mit gebogenem Glasrohr, 2 Stopfen, Kunststoffschüssel, Stative, Klemmen, Leitungswasser (je nach Wasserhärte ggf. Aqua dest.), Kohlenstoffdioxid, Stickstoff.



**Abbildung 6: Die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> (abgeändert nach Paschmann 2000 S. 85 – 86)**

Durchführung: der Schlauch wird in den oberen 50 Zentimetern kalibriert. Er wird unten mit einem Stopfen verschlossen, randvoll mit kaltem Leitungswasser gefüllt und abgesenkt, so dass die untere Öffnung in die mit Wasser gefüllte Kunststoffschüssel taucht. Nachdem man das obere Ende ebenfalls mit einem Stopfen verschlossen hat, wird der untere Stopfen entfernt. Mit Hilfe des Kolbenprobers, an dessen Ende sich ein Schlauchstück mit gebogenem Glasrohr befindet, werden nun 100 mL Kohlenstoffdioxid gefüllt und langsam durch die untere Öffnung eingeleitet. Der Versuch wird mit Stickstoff wiederholt.

Beobachtung: Die Kohlenstoffdioxidblasen, die durch das Rohr nach oben steigen, werden immer kleiner. Von 100 mL Kohlenstoffdioxid bleibt durchschnittlich ein Restvolumen von 10 mL über. Wird Stickstoff in Wasser geleitet, bleiben die Gasblasen in ihrer Größe konstant. Im Gasraum des Schlauches ist ein Volumen von 117 mL Stickstoff nachzuweisen, wenn 100 mL Stickstoff mit dem Kolbenprober eingeleitet werden.

Deutung: Die Löslichkeit von Stickstoff in Wasser ist deutlich geringer als von Kohlenstoffdioxid in Wasser. Stoffartspezifische Eigenschaften der Gase bestimmen ihre Löslichkeit in Wasser.

Die Volumenzunahme von Stickstoff steht ursächlich mit dem Gewicht der Wassersäule in Verbindung, die einen Unterdruck im Gasraum bewirkt. Die Summe des Druckes der Wassersäule und des Gasdruckes über der Wassersäule entspricht dem Atmosphärendruck. Unter der Annahme, dass eine Wassersäule von 1 m einen Druck von 98 hPa ausübt und die Höhe der vorhandenen Wassersäule 1,54 m beträgt, ergibt sich dann ein Druck 151 hPa für die Wassersäule. Der Druck im Gasraum nach Entfernen des unteren Stopfens beträgt 862 hPa. Bei einem Atmosphärendruck von

1013 hPa nehmen Gase ein Volumen von 100 mL ein. Reduziert sich der Druck auf 862 hPa, beträgt das Volumen 117 mL (Paschman 2000 S. 85-86).

#### ***Versuch 4: Löslichkeit von Stickstoff unter Druck in unpolaren Medien***

Geräte und Chemikalien: Stickstoff, 100 mL – Kolbenprober mit Hahn, Speiseöl, 100 mL – Becherglas

Durchführung: Der Stempel des Kolbenprobers wird mit Speiseöl eingefettet. 30 mL Speiseöl und 20 mL Stickstoff werden in den Kolbenprober eingebracht. Man bewegt den Stempel einige Male hin und her, so dass die Wandungen gut mit Öl beschichtet sind. Auf diese Weise erreicht man die für das Experiment nötige Dichtigkeit des Kolbenprobers. Nun presst man den Stempel kräftig ein und sorgt gleichzeitig während 30 Sekunden durch Schütteln für eine gute Durchmischung des Stickstoffs mit dem Öl. Der Kolbenprober wird dann anschließend unter Beibehaltung des Druckes so lange senkrecht gehalten, bis sich die durch das Schütteln eingetragenen Gasblasen entbunden haben. Anschließend entspannt man das System und erzeugt durch leichtes Herausziehen des Stempels einen leichten Unterdruck.

Beobachtung: Nach dem Entspannen des Systems ist zu beobachten, dass sich viele kleine Gasblasen im Öl bilden und nach oben steigen. Dies wird verstärkt, wenn der Stempel weiter herausgezogen wird und so ein höherer Unterdruck entsteht. Der Vorgang ist reversibel.

Deutung: Bei Druckerhöhung löst sich Stickstoff im Speiseöl. Wird der Druck vermindert, nimmt auch die Löslichkeit des Gases im Speiseöl ab.

Anmerkung: Im Prinzip ließe sich auch Ethanol für diesen Versuch verwenden, da von diesem Lösungsmittel pro Liter bei 0°C und 1013 hPa immerhin 120 mL Stickstoff aufgenommen werden, von Wasser hingegen nur 23,2 mL. Die Verwendung von Speiseöl ist in diesem Zusammenhang eher angebracht, da eine Analogie zu den physiologischen Prozessen gegeben ist.

#### **Barotrauma: Lernstation 3**

Beim Tauchen verspürt man bereits in 2 - 3 m Tiefe einen deutlichen Druck auf den Ohren. Setzt man den Abtauchvorgang fort, verstärkt sich der Druck und wird schließlich so schmerzhaft, so dass man auftauchen muss. Damit es nicht soweit kommt, muss der Druckausgleich bereits herbeigeführt werden, bevor sich die geringsten Anzeichen eines Druckgefühls ankündigen. Dazu genügt meistens eine einfache Schluckbewegung. Hilft dieses nicht, hält man die Nasenflügel mit den Fingern zusammen und versucht gleichzeitig durch die Nase auszuatmen.

Bei Erkältungen und angeschwollenen Schleimhäuten kann man durch Schlucken oder Pressen den Druck auf den Ohren nicht lindern. Taucht man trotzdem tiefer, kommt es zu stechenden

Schmerzen, und Schwindelgefühle stellen sich ein. Setzt man den Tauchgang trotz auftretender Schmerzen weiterhin fort, tritt in das Mittelohr Gewebeflüssigkeit ein. Zugleich wölbt sich das Trommelfell nach innen und kann zerreißen.

### ***Ursachen***

Barotrauma ist der Fachausdruck für alle Verletzungen (Trauma), die durch fehlenden Druckausgleich entstehen. Der menschliche Körper besitzt mehrere luftgefüllte Hohlräume, die alle mit der Außenluft in Verbindung stehen. Zu unterscheiden sind elastische von starrwandigen Hohlräumen. Die Lunge stellt durch das sehr nachgiebige Rippen – und Lungenfell und das gut verschiebbare Zwerchfell eine elastische Körperhöhle dar.

Eher starrwandig ist die Paukenhöhle im Mittelohr. Ist die Verbindung mit der Außenluft unterbrochen, so folgen bei Druckänderungen die Volumenänderungen der Luft dem Boyle – Mariott- schen – Gesetz, das heißt das Volumen ändert sich umgekehrt proportional zum Druck. Es gilt:

$$p \cdot v = \text{const} \quad \text{oder} \quad v = \frac{\text{const}}{p}.$$

Die Druckänderung wirkt sich auf Lunge und Mittelohr wie folgt aus: Wird der Atem angehalten und von der Wasseroberfläche 10 m tief abgetaucht, so steigt der Umgebungsdruck und damit auch der Druck in der Lunge auf das Doppelte an. Entsprechend wird die in der Lunge eingeschlossene Luft auf die Hälfte ihres Volumens komprimiert. Umgekehrt dehnt sich die in der Lunge eingeschlossene Luftmenge beim Auftauchen aus 10 m Tiefe an die Wasseroberfläche auf das Doppelte aus. Da der absolute Druck beim Abtauchen in die Tiefe alle 10 m linear um ein Bar ansteigt, sind die relativen Druckänderungen in der Nähe der Wasseroberfläche am größten. Ein Abtauchen von der Wasseroberfläche auf 10 m Wassertiefe bedeutet einen Druckanstieg um 100%, ein Abtauchen von 10 m Wassertiefe auf 20 m Wassertiefe einen Anstieg um 50%. Ein Abtauchen von 20 m auf 30 m Wassertiefe bedeutet hingegen nur einen Anstieg um 33%.

Das Mittelohr spielt für die Vorgänge beim Tauchen eine wichtige Rolle. Als Mittelohr werden die luftgefüllte Paukenhöhle und deren Nebenhöhle bezeichnet. In der Paukenhöhle liegen die Gehörknöchelchen. Über die Eustachische Röhre, auch Ohrtrumpete genannt, wird der Luftdruck in der Paukenhöhle reguliert. Ist im Rahmen einer Erkältung die Paukenhöhle zugeschwollen und setzt sich der Schwimmer trotzdem einer Druckänderung aus, so ist eine Volumenänderung mit gleichzeitiger Druckanpassung an den sich ändernden Umgebungsdruck nicht möglich. Durch die Schwellung der Schleimhäute wird ein Druckausgleich im Mittelohr über die Eustachische Röhre verhindert. In der Paukenhöhle entsteht ein Unterdruck. Bereits 3 – 5 m Tauchtiefe reichen aus, um das Trommelfell so nach innen zu dehnen, dass es reißt. Platzt das Trommelfell, so hat das für den Taucher unter Umständen tödliche Folgen. Es strömt kälteres Wasser in das Mittelohr und in das

Innenohr ein, so dass das Gleichgewichtsorgan massiv gereizt wird und bei einsetzender Orientierungslosigkeit kann dies zum Ertrinken führen.

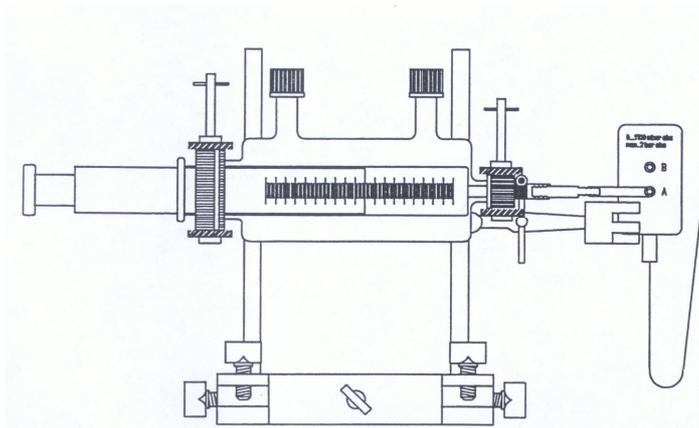
Beim Schnorcheln befindet sich der Körper unter Wasser und damit in einer Umgebung mit höherem Druck als an der Wasseroberfläche. Die Lunge ist über den Schnorchel mit der Umgebungsluft verbunden und damit einem niedrigeren Druck ausgesetzt. Somit ergeben sich Druckdifferenzen zwischen dem unter höherem Druck stehenden Lungenkapillaren und den unter niedrigerem Druck stehenden Lungenbläschen. Bereits bei einer Verlängerung des Schnorchels auf 60 cm wäre die Druckdifferenz so groß, dass Blutflüssigkeit von den Kapillaren in die Lungenbläschen gepresst würden. Hinzu kommt, dass beim Einatmen maximal ein Druck von 11 kPa (112 cm Wassersäule) erzeugt werden kann. Die Einatmung ab 112 cm Wassertiefe ist nicht mehr möglich.

### ***Experimentelle Umsetzung***

#### ***Versuch 6: Der Boyle – Mariotte Versuch (vgl. Anhang S. L 21.)***

##### **Variante a**

Material: Fuß, 250 mm-Stativstangen, 3 Doppelmuffen, 2 Universalklemmen, 1 Universalklemme mit Gelenk, 100 mL – Gasspritze, 8/4 mm – Reduktionsstück, 2 Schlauchschellen mit einem Durchmesser von 6-12 mm, digitales Barometer, digitales Manometer, Silikonschlauch mit einem Innendurchmesser von 2 mm, Trichter, Motorenöl.



**Abbildung 7: Versuchsaufbau nach dem Glasmantelsystem (Lindenblatt & Jung 2000, S. 13)**

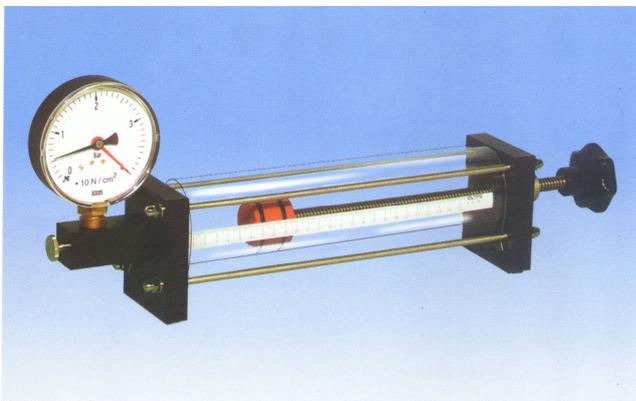
Durchführung: Der Aufbau erfolgt wie abgebildet. Der Kolben der Gasspritze wird auf 50 mL eingestellt und der Stutzen der Gasspritze mit einem möglichst kurzen Schlauchstück am Reduzierstück befestigt. Um Temperaturveränderungen während des Experimentes zu vermeiden,

wird in den Glasmantel Wasser gefüllt. Der Druck wird durch Verschieben des Kolbens so eingestellt, dass der am Manometer angezeigte Druck mit dem Druck, der am Barometer abzulesen ist, übereinstimmt. Manometeranzeige und Volumen werden notiert. Der Kolben wird in kleinen Schritten von 2 bis 3 mL eingeschoben und die jeweiligen Werte für Volumen und Druck werden notiert.

**Tabelle 1: Die Abhängigkeit des Drucks vom Volumen (Variante a)**

V in ml	p in hPa	p·V in Nm
50	1000	5,00
48	1040	4,99
46	1080	4,97
44	1130	4,97
42	1180	4,96
40	1240	4,96

**Variante b**



**Abbildung 8: Das Boyle – Mariotte – Gerät der Fa. Elwe**

Durchführung: In einer zweiten Versuchvarianten wird das Boyle - Mariotte – Gerät benutzt. Das Gerät besteht aus einem Zylinder mit Kolben und Manometer. Durch eine Gewindestange mit Griff kann der Kolben im Zylinder bewegt werden. Am Zylinder ist ein Millimetermaßstab angebracht. Als Sicherungsmaßnahme ist der Zylinder mit einem durchsichtigen Mantel aus Plexiglas umgeben. Das Gerät wird mit Hilfe der linken Einstellschraube belüftet. Dann wird die Belüftungsschraube verschlossen und mit der Messung durch Komprimieren der eingeschlossenen Luftmenge begonnen.

**Tabelle 2: Die Abhängigkeit des Drucks vom Volumen (Variante b)**

<b>l</b> in cm	<b>V</b> in cm <sup>3</sup>	<b>p</b> in N/cm <sup>2</sup>	<b>p·V</b> in Nm
10	125,7	10,1	1,3
9,5	119,4	10,8	1,3
9	113,04	11,3	1,3
8,5	106,76	12,1	1,3
8	100,48	13	1,3
7,5	94,2	13,9	1,3
6,5	81,64	16,1	1,3
6	75,36	17,7	1,3
5,5	69,08	18,8	1,3
5	62,8	21,2	1,3
4,5	56,52	23,5	1,3

Deutung: Das p – v- Diagramm zeigt einen Hyperbelast: Das Produkt aus Druck und Volumen ist bei isothermen Zustandsänderungen und bei Luft mit nicht zu hoher Dichte und nicht zu geringer Temperatur konstant. Diese Gesetzmäßigkeit, die von Boyle – Mariotte entdeckt wurde, gilt für ideale Gase.

#### **Atmen bei erhöhtem oder erniedrigtem Druck: Lernstationen 4 und 5**

(Die Lernstation 4 ‚Sauerstofftherapie‘ und die Lernstation 5 ‚Atmen in großen Höhen‘ werden zusammengefasst.)

#### ***Phänomen bei Druckerhöhung***

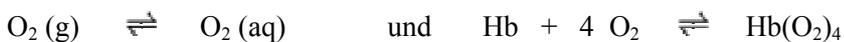
Taucher, die bei ihren Tauchgängen große Tiefen erkunden und unerfahren sind, setzen sich der Gefahr eines Tauchunfalls aus. Werden die vorgeschriebenen Dekompressionspausen nicht eingehalten, stellen sich nach dem Tauchgang die Beschwerden ein, die unter dem Begriff Dekompressionskrankheit zusammengefasst werden.

Die Standardtherapie nach einem Tauchunfall ist die Behandlung in einer Überdruckkammer. Hyperbare Oxigenation – abgekürzt: HBO - ist die Bezeichnung für die Sauerstoff – Überdruck – Therapie. Bei dieser Behandlungsform atmet der Patient in einer sogenannten Überdruckkammer reinen Sauerstoff ein. Der Umgebungsdruck in der Kammer kann bis zu 300 kPa Überdruck betragen. Durch das Einatmen von Sauerstoff unter Überdruck wird der Sauerstoffpartialdruck im Blut erhöht.

Gelangt in der Lunge Sauerstoff von den Alveolen in die arteriellen Lungenkapillaren, wird das Gas zunächst physikalisch gelöst. Die Löslichkeit des Sauerstoffs in der Flüssigkeit ist nach dem Gesetz von Henry proportional zum Partialdruck in der mit der Flüssigkeit in Kontakt stehenden Gasphase. Der überwiegende Teil des Sauerstoffs, der im Blut gelöst ist, wird an Hämoglobin gebunden. Die Quartärstruktur des Hämoglobins besteht aus vier Eiweiß- und vier Farbstoffkomponenten, den Hämgruppen. Eine Hämgruppe enthält ein zweifach positiv geladenes Eisenion, das von vier Porphyrinsystemen umschlossen ist. Vier Sauerstoffmoleküle können nacheinander an vier Eisenionen komplexartig gebunden werden.

Wird die Sättigung des Hämoglobins in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck gemessen, ergibt sich eine sigmoide Sättigungskurve, wobei der Anstieg bei niedrigen Partialdrücken gering ist, bei mittleren Partialdrücken stärker zunimmt und näherungsweise linear wird und bei höheren Partialdrücken abnimmt. Die Bindung eines unbeladenen Hämoglobinmoleküls mit einem Sauerstoffmolekül führt nach einer zur Zeit akzeptierten Modellvorstellung zu einer festeren Bindung mit den nachfolgend gebundenen Sauerstoffmolekülen. Das Hämoglobin ( $\text{Hb}_{\text{dunkelrot}}$ ) geht dabei in Oxyhämoglobin ( $\text{Hb}(\text{O}_2)_4_{\text{hellrot}}$ ) über.

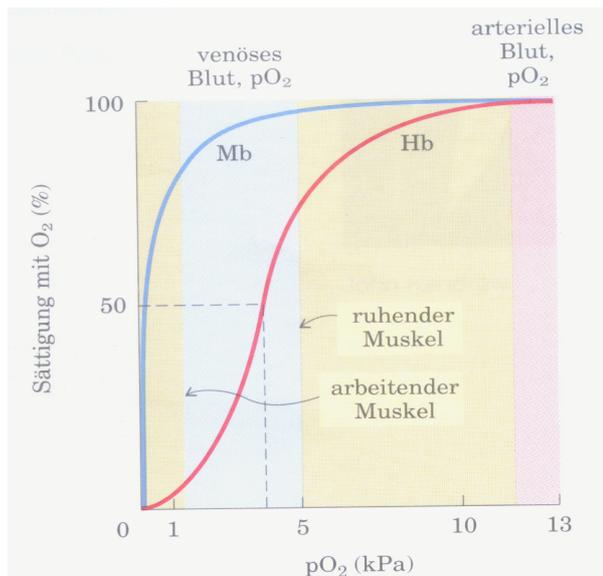
Folgende Gleichgewichte liegen vor:



Wenn eine eintretende Raumstrukturänderung die Sauerstoffbindungsfähigkeit des Hämoglobins erniedrigt und das Hämoglobin in einer Untereinheit den gebundenen Sauerstoff abgibt, ist nach dem Modell die Abgabe des Sauerstoffs von den anderen drei Untereinheiten begünstigt (Schmidt et al. 2000 S. 609).

Bei einem Sauerstoffpartialdruck, der einer typischen Situation im Bereich der Körpergewebe entspricht, ist das Hämoglobin nur zu 70% gesättigt. Bei einem Partialdruck, der in den Lungen vorherrscht, liegt die Sättigung des Hämoglobins bei nahezu 100%. Ungefähr 30% des gebundenen Sauerstoffs wird vom Hämoglobin bei normaler Stoffwechselaktivität ins Gewebe abgegeben. Weitere 50% können von stark stoffwechselaktiven Geweben dem Hämoglobin entzogen werden.

Vorhandene Oxoniumionen beeinflussen die Raumstruktur des Hämoglobins. Die Sättigungskurve des Hämoglobins verschiebt sich nach rechts. Bei gleichem Sauerstoffpartialdruck wird bei sinkendem pH – Wert mehr Sauerstoff abgegeben. Dies trifft für stark aktive Gewebe zu, die im Rahmen der Zellatmung viel Kohlenstoffdioxid produzieren, was dann in der Reaktion mit Wasser Hydrogencarbonat- und Oxoniumionen liefert.



**Abbildung 9: Die Sauerstoffsättigung des Hämoglobins und des Myoglobins in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck (Lehninger et al. 1998, S. 210)**

Bei Normaldruck hat nahezu 100% des Hämoglobins Sauerstoff gebunden. Bei Erhöhung des Partialdruckes wird der ungebundene Sauerstoff im Plasma gelöst und steht direkt dem Gewebe zur Verfügung. Bei der Hyperbaren Oxigenation, bei der der Druck auf 280 kPa erhöht wird, diffundiert daher vermehrt Sauerstoff in das Gewebe. Umgekehrt erhöht sich der Anteil des Stickstoffs, der aus dem Gewebe in die Kapillaren wandert. Je größer die Partialdruckdifferenz zwischen Gewebe und Blut ist, desto schneller findet der Austausch von Stickstoff und Sauerstoff im Gewebe statt. Wird der Druck von 280 kPa auf 101,3 kPa über sechs Stunden stufenweise gesenkt, so entspricht dies den nötigen Dekompressionspausen, um den in den Blutkreislauf eingeschleusten Stickstoff angemessen abzuatmen. Bei geeigneter Dauer des Aufenthalts in der Überdruckkammer und passend simulierten Dekompressionspausen kann der überschüssige Stickstoff abgeatmet werden, ohne dass er über den arteriellen Kreislauf ins Gehirn oder ins Rückenmark gelangt.

### ***Phänomene bei Druckerniedrigung***

Bergsteiger, die große Höhen erklimmen, setzen sich der Gefahr aus, an der Höhenkrankheit zu erkranken. Um sich auf den Aufstieg zum Gipfel vorzubereiten, wird der Gipfelsturm in einer Druckkammer simuliert. Der Druck wird allmählich auf die entsprechenden Werte vermindert. Nicht für alle ist der Aufenthalt in der Druckkammer unproblematisch. Es können Symptome der Höhenkrankheit auftreten. Zu den körperliche Beeinträchtigungen, die mit einer Höhenkrankheit einher gehen, gehören Kurzatmigkeit, Kopfschmerzen und Übelkeit.

Handelt es sich um die leichte Form, verbessert sich das allgemeine Befinden deutlich, wenn der Betroffene einen Ruhetag einnimmt oder absteigt. Auf Sauerstoffmangel reagiert der Körper in

scheinbar widersprüchlicher Weise. Die Atmung wird tiefer und schneller, so dass der Sauerstoffpartialdruck in den Lungenbläschen steigt. Gleichzeitig nimmt aber der Kohlenstoffdioxidpartialdruck ab. Damit droht eine durch die Hyperventilation bedingte Alkalose, die der Organismus kompensiert durch eine vermehrte Hydrogencarbonatausscheidung in der Niere. Die Akklimatisierung hängt im wesentlichen davon ab, in wie weit die gegensätzlichen Forderungen – zusätzliches Sauerstoffangebot und konstanter pH – Wert - erfüllt werden. Der Kopfschmerz ist ein auffälliges Kennzeichen der Höhenkrankheit. Seine Ursache ist bisher unklar. Vermutlich lösen Reaktionen in der empfindlichen Hirnhaut den Schmerz aus.

Eine ernsthafte Form der Erkrankung liegt dann vor, wenn zusätzlich zur Kurzatmigkeit ein quälender Husten mit blutvermischem, schaumigem Auswurf auftritt. In der Regel hat sich dann schon Flüssigkeit in den Lungenflügeln angesammelt. Sauerstoffarmut führt aus noch unbekanntem Gründen (Houston 1992 S. 68, Richter 2002 S. 35 - 42) zu einer Verengung der Lungenkapillaren, die die Alveolen umgeben. Der Gefäßwiderstand erhöht sich um das Drei – bis Fünffache. Durch den hohen Druck von innen werden die Zellmembranen durchlässig und Flüssigkeit wird aus den Gefäßen in die Lungenbläschen gepresst. Angenommen wird, dass die Zellschicht, welche die Adern auskleidet, überdehnt wird, was zur Freisetzung von Eikanosoiden führt. Diese Gewebeshormone bewirken, dass die Blutgefäße durchlässiger werden. Damit kann Blutplasma zwischen die Endothelzellen der Lungenbläschen und der Kapillaren austreten und in die Alveolen fließen. Durch die Ansammlung der Flüssigkeit vermindert sich die Sauerstoffaufnahme.

Die Reaktionen des Organismus auf ein vermindertes Sauerstoffangebot sind auf zellulärer Ebene noch nicht vollständig bekannt. Diskutiert wird, dass sich der Sauerstoffmangel auf die Funktion der energieverbrauchenden Natrium – Kalium - Pumpen in den Zellmembranen auswirkt. Die Natrium – Kalium - Pumpen sind dafür verantwortlich, dass jede Körperzelle eine angemessene Natrium - und Kaliumionenkonzentration aufrecht erhält. Liegt ein Sauerstoffmangel vor, fallen die Pumpen der Zellmembranen aus und die Leckströme der Ionen können nicht mehr kompensiert werden. Gemäß dieser Vorstellung reichern sich Natriumionen in der Zelle an und Kaliumionen diffundieren aus der Zelle heraus. Da die Bilanz der Natrium- und Kalium - Ionendiffusion mit ihren negativen Begleititionen nicht ausgeglichen ist, vermindert sich die Gesamtionenkonzentration in der Zelle. Das führt zu einem Wasseraustritt aus den Zellen und damit zu Wasseransammlungen in den Gewebezwischenräumen. Durch die entstehenden Ödeme und die damit verknüpften Flüssigkeitsansammlungen in den Alveolen wird die Sauerstoffaufnahme verringert.

## ***Experimentelle Umsetzung***

### ***Versuch 5: Oxi- und Desoxihämoglobin (Anhang S. L 34 ff)***

#### **Variante a**

Geräte und Chemikalien: Schweineblut, drei 500 mL – Erlenmeyerkolben, 3 Glasstäbe, Gaseinleitungsrohr, 4%ige Natriumcitratlösung, 5%ige Ammoniumoxalatlösung, Propanol, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid.

Durchführung: 300 mL Blut werden mit 50 mL Natriumcitratlösung oder mit Ammoniumoxalatlösung gut verrührt. Die Behandlung dient dazu, Calciumionen zu fällen, um die Gerinnung zu verhindern. Zwei 100 mL – Bechergläser werden mit je 100 mL Blut des Citrat- oder Oxalatblutes gefüllt und mit 2 –3 Tropfen Propanol zur Minderung der Schaumbildung versetzt. In das eine Becherglas wird Sauerstoff, in das andere Kohlenstoffdioxid eingeleitet. Anschließend werden die beiden Bechergläser vertauscht und wiederholt Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid eingeleitet. Dies wiederholt man mehrere Male.

Beobachtung: Durch Einleitung von Sauerstoff verfärbt sich das Blut heller rot. Wird Kohlenstoffdioxid eingeleitet, ändert sich die Färbung ins Dunkelrote. Die Vorgänge sind reversibel durchführbar.

#### **Variante b**

Geräte und Chemikalien: 2 Waschflaschen, 2 Kolbenprober, 3 Schlauchstücke, Blut, Wasser.

Durchführung: 50 bis 100 mL Wasser werden in eine Waschflasche gegeben und mit Kohlenstoffdioxid versetzt. Man schaltet eine zweite mit Kalkwasser gefüllte Waschflasche in Reihe dazu und leitet danach Stickstoff durch die Lösungen. Jede Waschflasche ist mit einem Kolbenprober verbunden. Der Kolbenprober, der an die Waschflasche angeschlossen ist, die das Wasser enthält, wird mit 100 mL Sauerstoff beschickt. Der Kolben des zweiten Kolbenprobers steht auf der Nullmarke. 100 mL Sauerstoff werden durch das System geleitet und das Volumen des Gases im zweiten Kolben notiert. Der Versuch wird mit Blut wiederholt.

Beobachtung: Wird Kohlenstoffdioxid eingeleitet, färbt sich das Blut dunkelrot. Durch Einleiten von Sauerstoff wird das Blut heller. Wird Sauerstoff durch Wasser geleitet, so werden nur 0 – 3 ml Sauerstoff gelöst. Im Blut hingegen lösen sich 5 – 10 ml. Kalkwasser färbt sich milchig.

Deutung: Im Wasser ist zunächst der Sauerstoffpartialdruck sehr gering, da der gelöste Sauerstoff durch Kohlenstoffdioxid und Stickstoff ausgetrieben wird. Durch Einleiten von 100 mL Sauerstoff

wird der Partialdruck des Sauerstoffs erhöht und etwas Sauerstoff löst sich im Wasser. Stickstoff und Kohlenstoffdioxid werden ausgetrieben. Kohlenstoffdioxid reagiert mit Kalkwasser zu Calciumcarbonat und das fällt aus. Das restliche Gas strömt in den zweiten Kolbenpober. Vor der Sauerstoffeinleitung war auch im Blut der Sauerstoffpartialdruck gering. Die dunkelrote Färbung verweist auf einen hohen Anteil von desoxygeniertem Hämoglobin. Der eingeleitete Sauerstoff reagiert mit dem Hämoglobin. Das aufgefangene Gasvolumen im zweiten Kolben ist daher geringer.

## **Blutpuffer - Möglichkeiten und Grenzen: Lernstation 6**

### ***Phänomen***

Der pH – Wert des Blutes ist für einen Arzt ein Kriterium, um eine mögliche Störung im Säure – Base – Haushalt des Patienten festzustellen. Immer dann, wenn ein Erkrankter bei Bewusstsein ist, aber hektisch ein- und ausatmet, ist dies für den behandelnden Arzt ein Hinweis dafür, dass der pH – Wert des Blutes nicht der Norm entspricht. Bei fehlender Behandlung droht Lebensgefahr.

Ein Erkrankter atmet sehr schnell ein und aus. Seine Blutuntersuchung ergibt einen pH – Wert von 7,2.

### ***Ursachen***

Der pH – Wert des arteriellen menschlichen Blutes ist im Normalfall nahezu konstant und das im Verlauf des ganzen Lebens. Er liegt im Bereich zwischen 7,37 und 7,43 bei einem Mittelwert von 7,4 bei 37°C. Folgendes Kohlensäure - Gleichgewicht liegt im Blut vor:



Hyperventiliert ein Erkrankter, und ist der pH – Wert des Blutes unter dem Normbereich abgesenkt, dann war der Säureeintrag ins Blut so hoch, dass die Puffereigenschaften des Blutes nicht mehr ausreichen. Durch Zugabe von Oxoniumionen wird das Kohlensäure – Hydrogencarbonat – Gleichgewicht gestört. Gemäß des ‚Le Chatelier Prinzips‘ versucht das System dieser Störung entgegenzuwirken. Vorhandene Hydrogencarbonationen reagieren mit Oxoniumionen unter Bildung von Kohlensäure, die wiederum zerfällt. Dabei erhöht sich die Stoffmenge der Kohlensäure und der Kohlenstoffdioxidpartialdruck nimmt zu. Die Hydrogencarbonationenkonzentration ist erniedrigt und wird zum begrenzenden Faktor. Die pH – Erniedrigung sorgt ihrerseits für eine Aktivierung des Atemzentrums, so dass infolge der Hyperventilation der Kohlenstoffdioxidpartialdruck abnimmt, wodurch der Säureeintrag kompensiert werden kann. Reicht die Hyperventilation als Kompensationsmaßnahme nicht aus, muss dem Patienten zusätzlich eine hydrogencarbonatreiche Infusion verabreicht werden.

### **Experimentelle Umsetzung**

#### **Versuch 7: Blut und Wasser im Vergleich (Anhang S. L 41)**

Geräte und Chemikalien: Vier 250 mL - Bechergläser, pH – Elektrode, Pasteurpipette, Salzsäure  $c = 0,1 \text{ mol/L}$ , Natronlauge  $c = 0,1 \text{ mol/L}$ , Schutzbrille.

Versuchsdurchführung: 50 mL Schweineblut werden in ein Becherglas gegeben und der pH – Wert mit einer pH – Elektrode bestimmt. Mit Hilfe einer Pasteurpipette werden fünf Tropfen Salzsäure mit der Konzentration  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  zu der Blutprobe getropft. Nach der jeweiligen Zugabe von einem Tropfen wird der pH – Wert bestimmt. Der Versuch wird mit Natronlauge der Konzentration  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  und einer neuen Blutprobe wiederholt. Der pH – Wert von Leitungswasser wird bestimmt. Dazu wird das Leitungswasser mit 5 Tropfen Salzsäure versetzt und der pH – Wert nach jedem Tropfen bestimmt. Der Versuch wird mit einer neuen Probe Leitungswasser mit 5 Tropfen Natronlauge wiederholt.

Deutung: Nach Zugabe von 5 Tropfen Säure erniedrigt sich der pH – Wert des Wassers von 7,7 auf 3,1, der pH – Wert des Blutes bleibt nahezu konstant. Werden 5 Tropfen Natronlauge hinzugegeben, erhöht sich der pH – Wert des Wassers von 7,7 auf 10,2, der pH – Wert des Blutes bleibt wie beim Säureeintrag nahezu konstant. Im Blut liegen verschiedene Puffersysteme vor, die den pH – Wert trotz Säure- oder Baseneintrag nahezu konstant erhalten.

**Tabelle 3: Puffereigenschaften von Blut und Wasser im Vergleich**

<b>Wasser</b>						
Tropfenanzahl der Säure	0	1	2	3	4	5
pH - Wert	7,7	7,1	6,2	4,9	3,5	3,1
Tropfenanzahl der Base	0	1	2	3	4	5
pH - Wert	7,7	8,9	9,3	9,7	9,9	10,2
<b>Blut</b>						
Tropfenanzahl der Säure	0	1	2	3	4	5
pH - Wert	7,36	7,37	7,36	7,35	7,35	7,35
Tropfenanzahl der Base	0	1	2	3	4	5
pH - Wert	7,36	7,35	7,35	7,36	7,40	7,43

#### **Versuch 8: Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Salzsäure (Anhang S. L 42)**

Geräte und Chemikalien: Durchsichtiger Kunststoffschlauch (Höhe: 2,05 m, Durchmesser<sub>(innen)</sub> 2,6 cm, erhältlich im Technikhandel), Kolbenprober, Schlauchstück, 2 Stopfen, Kunststoffschüssel,

Salzsäure (R 36/37/38 S(2)-28)  $c = 2\text{ mol/L}$ , Trichter, Standleiter, Zollstock, Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Ausströmerstein.

Versuchsdurchführung: Der Kunststoffschlauch wird unten mit einem Stopfen verschlossen und randvoll mit Salzsäure der Konzentration  $c = 2\text{ mol/L}$  gefüllt. Der Schlauch wird soweit abgesenkt, bis die untere Öffnung in eine mit Wasser gefüllte Kunststoffwanne tief eintaucht. Das obere Ende des Schlauches wird ebenfalls mit einem Stopfen verschlossen. Der untere Stopfen wird vorsichtig entfernt. Mit Hilfe eines Kolbenprobers, an dessen Ende sich ein Schlauchstück mit einem länglichen Ausströmerstein (im Aquarienhandel erhältlich) befindet, werden 100 mL Kohlenstoffdioxid durch die untere Öffnung eingeleitet. Zum Vergleich wird der Schlauch mit Wasser gefüllt, und es werden ebenso 100 mL Kohlenstoffdioxid eingeleitet.

Beobachtungen: Wird der Kunststoffschlauch mit Salzsäure  $c = 2\text{ mol/L}$  gefüllt, beträgt die Länge der Gassäule 8,5 cm. Liegt eine Konzentration der Salzsäure von  $c = 1\text{ mol/L}$  vor, so ist die Länge der Gassäule 1,8 cm. Ist der Kunststoffschlauch mit Wasser gefüllt, so beträgt die Länge der Gassäule 1 cm.

Deutungen: Das Gasvolumen von Kohlenstoffdioxid hat bei Normaldruck einen Wert von 3,93 mL. Demnach haben sich 96,07 ml Kohlenstoffdioxid im Wasser gelöst (zur Volumenbestimmung vgl. Anhang S. L 49). In zweimolarer Salzsäure haben sich nach dem experimentellen Ergebnis 33,68 mL Kohlenstoffdioxid gebildet und 66,32 mL Kohlenstoffdioxid gelöst. Im sauren Milieu erhöht sich der Partialdruck von Kohlenstoffdioxid. Die Lage des Kohlensäuregleichgewichtes ist zugunsten von Kohlenstoffdioxid verschoben.

## **Puffer im Vergleich: Lernstation 7**

### ***Phänomen***

Ein verstärktes Ein – und Ausatmen ist eine Kompensationsmaßnahme des Körpers, um den durch Säureeintrag erniedrigten pH – Wert des Blutes dem Normbereich anzugleichen. Gelingt dies durch Hyperventilation nicht, werden als therapeutische Maßnahmen Infusionslösungen verabreicht. Dabei handelt es sich in der Regel um Natriumhydrogencarbonatlösungen, die eine Störung im Säure – Base – Haushalt aufheben sollen.

### ***Experimentelle Umsetzung***

***Versuch 9: Die potentiometrische Titration einer Infusionslösung (Anhang S. L 50).***

Geräte und Chemikalien: pH – Elektrode, Bürette, Trichter, 250 mL – Becherglas, 20 mL – Pipette, 100 mL – Messzylinder, Reagenzglasständer mit 2 großen Reagenzgläsern, Aqua dest., Eichlösungen pH = 7 und pH = 4, Salzsäure mit der Konzentration  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  (R 36/37/38 S(2)-28), Natriumhydrogencarbonatlösung mit der Konzentration  $c = 0,0252 \text{ mol/L}$  (Die Konzentration entspricht der in Apotheken käuflichen Infusionslösung.), frisches Schweineblut, Schutzbrille.

Versuchsdurchführung: In das Becherglas werden 20 mL Infusionslösung gegeben und 100 mL Aqua dest. hinzugefügt. Die Vorlage wird mit Salzsäure titriert und der jeweilige pH – Wert gemessen. Die Titration wird mit 120 mL Aqua dest. und 120 mL Schweineblut wiederholt.

**Abbildung 10: Titrationskurven von Blut, Hydrogencarbonat und Wasser nach Schülerergebnissen, siehe Anhang Seite L-56**

### ***Deutung: Titration der Infusionslösung***

Je mehr sich die Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlensäure unterscheiden, desto stärker wirkt sich die gleiche Stoffportion der eingetragenen Säure auf den pH – Wert des sich neu einstellenden Gleichgewichtes aus. Die Stoffmenge von Hydrogencarbonat wird durch die eingetragene Stoffmenge der Oxoniumionen im gleichem Maß reduziert wie die Stoffmenge der Kohlensäure zunimmt. Die Summe der jeweiligen Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlensäure bleibt konstant. Was sich ändert, ist der pH – Wert. Die pH – Änderung bei definiertem Säureeintrag ist groß, also die Pufferkapazität einer Pufferlösung gering, wenn sich die Stoffmengen von Pufferbase und korrespondierender Säure deutlich unterscheiden. Entsprechend ist die Pufferkapazität einer Lösung hoch, also die pH – Änderung bei gleich molarem Säureeintrag geringfügig, wenn die Stoffmengenkonzentrationen von Puffersäure und Pufferbase gleich sind. Der pH – Wert, der sich je nach Verhältnis von Pufferbase zu Puffersäure einstellt, lässt sich mit Hilfe des Massenwirkungsgesetzes näherungsweise berechnen.

### ***Titration von Schweineblut***

Der nahezu lineare Verlauf der Kennlinie des Blutes im pH – Wert – Volumen – Diagramm lässt darauf schließen, dass im Blut mehrere Puffersysteme beteiligt sind. Im wesentlichen handelt es sich dabei um das Hydrogencarbonat - Puffersystem und das sogenannte Proteinat - Puffersystem. Das Phosphatpuffersystem ist im Blut zu vernachlässigen, da der Puffereffekt aufgrund der geringen Konzentrationen von Dihydrogenphosphat und Monohydrogenphosphat im Blutplasma zu gering ist, obwohl der  $pK_s$  – Wert mit 6,8 im physiologisch günstigen Bereich liegt. Die Puffereigenschaften der Proteine im Blut werden durch die ionisierbaren Gruppen der Aminosäuren bestimmt, wobei die Carboxylgruppen und Aminogruppen am Ende der Peptidketten bedeutungslos sind, da sie zum einen in ihrer Gesamtanzahl relativ gering sind und ihre  $pK$  – Werte

sich stark vom physiologischen pH – Wert unterscheiden. Entscheidend an der Pufferung des Blutes beteiligt sind die ionisierbaren Seitenketten der Proteine. Im physiologischen pH – Wertebereich sind es primär die Seitenkette des Histidins. Die Seitenkette der freien Aminosäure Histidin hat einen  $pK$  – Wert von 6 und Proteine mit Histidinresten können in der Nähe eines neutralen pH – Wertes wirksam puffern. In dem pH – Bereich zwischen 3 und 5 zeigen Glutamat- und Aspartatseitenketten eine hohe Pufferkapazität. Freies Aspartat puffert zwischen den pH – Werten von 4,15 und 3,15, freies Glutamat zwischen 4,75 und 3,75. Zu der Proteinpufferkapazität tragen sowohl die Plasmaproteine mit  $5 \text{ mmol L}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$  als auch das Hämoglobin mit  $16 \text{ mmol L}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$  bei. Die Gesamtkonzentration der Pufferbasen im arteriellen Blut beträgt etwa  $48 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### ***Titration von Wasser***

Versteht man unter Pufferkapazität einer Pufferlösung diejenige Stoffmenge an Oxoniumionen, die man zugeben muss, um den pH – Wert der Lösung um eine Einheit zu verändern, so besitzt Wasser eine ausgesprochen schlechte Pufferkapazität. 0,1 mmol Säure reichen aus, um den pH – Wert um drei pH - Einheiten zu verändern. In Wasser liegen keine messbaren Pufferbasen vor. Die pH – Änderung entspricht dem Oxoniumionenzusatz. Eine messbare Abschwächung des sauren Eintrages findet nicht statt. Da nicht die Konzentration der Oxoniumionen gemessen wird sondern der pH – Wert, ruft bei der Titration von Wasser die Zugabe der gleichen Stoffportion Salzsäure im schwach sauren Bereich eine deutlich stärkere Veränderung des pH – Wertes hervor als der äquimolare saure Eintrag in eine schon stark saure Lösung.

Im Anhang L zu Kapitel 3 sind alle Lernstationen mit Lehrerinformationen für die unterrichtliche Umsetzung mit alternativen Versuchsbeschreibungen ausführlich dargestellt.

### **3.3.3 Abstraktion und Vernetzung**

Der Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ knüpft inhaltlich an den Lernzyklus ‚Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffdioxidkreislauf‘ an (vgl. Paschmann et al. 2000, S. 170-175 und S. 227 – 231). In den ersten drei Phasen des Lernzyklus sind im wesentlichen die Atemgasaufnahme und der Atemgastransport im menschlichen Körper thematisiert. Es handelt sich um Gleichgewichtsbetrachtungen unterschiedlicher Komplexität. Angesprochen sind das Löslichkeitsgleichgewicht von Stickstoff, seine mathematische Beschreibung und seine Störung durch Druckänderungen. Daran schließen sich Betrachtungen über die Löslichkeitsgleichgewichte von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff an. Komplex wird die Betrachtung dadurch, dass insbesondere das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern in einem System von Gleichgewichten zu beschreiben ist, die sich wechselseitig

beeinflussen. Die horizontal vernetzten Inhalte des inneren Kohlenstoffdioxidkreislaufes sind vertikal vernetzt mit dem äußeren Kohlenstoffkreislauf, der unterrichtlich in der Jahrgangsstufe 11 verankert ist (vgl. Paschmann et al. 2000 S. 170 - 174).

Eine zur Zeit akzeptierte Forschungshypothese geht davon aus, dass mehr behalten wird, wenn erworbenes Wissen im neuen Sachverhalt vertieft und mit verwandten Fragestellungen aus anderen Sachgebieten vernetzt worden ist (Häußler et al. 1998 S. 214-217, Mandl et al. 1997 S. 170). Nach Parchmann und Ralle (2001 S. 2 - 7, 2000 S. 132 - 137) muss, um die Behaltensleistung zu steigern, das im Kontext erworbene allgemeingültige Wissen vom Kontext losgelöst werden. Ihre Hypothese geht davon aus, dass die Abstraktion allgemeingültiger Zusammenhänge und die Anwendung der chemischen Inhalte in anderen Kontexten notwendige Voraussetzungen sind, um ein Wissensfundament aufzubauen, das als allgemeingültiges Wissen für den Lernenden frei verfügbar ist. Gefragt sind motivierende Aufgabenstellungen in *sinnstiftenden* Zusammenhängen, die als *Brückenaufgaben* eine Vernetzung zu anderen Kontexten herstellen. Gefragt ist auch eine methodische Unterstützung für die Entwicklung der allgemeingültigen chemischen Inhalte, die als Einzelbausteine die Entwicklung eines Basiskonzepts ermöglichen.

Die letzte Phase des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ist die *Phase der Abstraktion und Vernetzung*. Das in der Erarbeitungsphase erworbene Wissen soll in einem neuen motivierenden Zusammenhang angewendet werden. Der Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ist mit dem Kontext ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ verknüpft. Verbindend ist die katalytische Wirkungsweise der Carboanhydrase. Die Carboanhydrase ist ein Enzym mit vielen Wirkungen (Rikus 1998 S.41 - 47). Im menschlichen Organismus befindet sie sich in den roten Blutkörperchen, in den Belegzellen der Magenschleimhaut, im Drüsenepithel der Bauchspeicheldrüse und in den Zellen, die die Nierenkanälchen auskleiden. Die Wirkungsweise der Carboanhydrase knüpft an Bekanntem an. Im Mittelpunkt steht das Kohlensäuregleichgewicht. Neu für die Lernenden ist, dass die Einstellung der Gleichgewichtslage durch die Carboanhydrase beschleunigt wird. Im menschlichen Körper katalysiert die Carboanhydrase drei wesentliche Prozesse:

- den Transport von CO<sub>2</sub> im Blut als Hydrogencarbonat,
- die Erzeugung protonenreicher Sekrete im Magen und
- die Bildung hydrogencarbonatreicher Sekrete in der Bauchspeicheldrüse und in der Niere.

Neu ist auch der Einfluss des Wirkungsortes der Carboanhydrase. Im Vergleich zum Reagenzglasversuch befindet sich die Carboanhydrase im menschlichen Organismus nicht in Körperflüssigkeiten, sondern ist zellulär in den Erythrozyten und in Epithelzellen unterschiedlicher Organe gebunden. Die Epithelzellen ermöglichen aufgrund ihrer Lage und der damit verknüpften unterschiedlichen Ausstattung eine Abgabe der Katalyseprodukte in verschiedene Systeme. So

werden protonenreiche Sekrete in den Mageninnenraum oder in die Nierenkanäle abgegeben sowie hydrogencarbonathaltige Sekrete in die Ausführungsgänge der Bauchspeicheldrüse.

Im Magen löst der Speisebrei die Bildung von Salzsäure aus. Dabei werden in den Belegzellen der Magenschleimhaut mit Hilfe der Carboanhydrase Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen gebildet. Die Oxoniumionen wandern in den Magenraum, die Hydrogencarbonationen in das Blut. Ein gefüllter Magen signalisiert der Bauchspeicheldrüse ein hydrogencarbonathaltiges Sekret zu bilden, das in den Darm ausgeschieden wird und den sauren Speisebrei neutralisiert. Gleichzeitig werden ins Blut Oxoniumionen abgegeben.

Die Carboanhydrase befindet sich auch in den Wandzellen der Nierenkanälchen und sorgt dort für die Rückgewinnung von Hydrogencarbonat ins Blut. Dort bindet sie aus dem Primärharn Hydrogencarbonat - und Oxoniumionen, so dass Kohlenstoffdioxid entsteht. Kohlenstoffdioxid diffundiert durch die Wandzellenmembranen und reagiert wiederum - durch Carboanhydrase katalysiert - zu Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen. Die Hydrogencarbonationen wandern im Konzentrationsgradienten ins Blut.

Im Gewebe diffundiert Kohlenstoffdioxid aus den Gewebezellen zunächst in das Blutplasma der umgebenden Kapillaren und von dort in die Erythrozyten. Dort wird die Protolysereaktion von der Carboanhydrase katalysiert. Die Oxoniumionen werden von dem roten Blutfarbstoff aufgenommen, der das wichtigste intrazelluläre Puffersystem darstellt. Hydrogencarbonationen reichern sich in den Erythrozyten an. Aufgrund des entstehenden Konzentrationsgradienten zwischen Erythrozyt und Plasma diffundiert Hydrogencarbonat ins Plasma. Zur Kompensation der fehlenden Anionen strömen Chloridionen in den Erythrozyten. Die Hydrogencarbonationen werden mit dem Blutstrom zur Lunge transportiert. Dort findet die Rückreaktion statt. Hydrogencarbonat und Oxoniumionen reagieren zu Kohlenstoffdioxid, das ausgeschieden wird.

### ***Phänomen***

Im Wasser liegen 99,8% des vorhandenen Kohlenstoffdioxids physikalisch gelöst vor. Der geringe Rest von nur 0,2 % reagiert mit Wasser zu Kohlensäure, die sofort protolysiert, so dass Hydrogencarbonationen entstehen. Im Blut hingegen sind 12% des transportierten Kohlenstoffdioxids physikalisch gelöst, fast 80% liegen als Hydrogencarbonat vor. Verantwortlich für den hohen Prozentsatz an Hydrogencarbonat im Blut ist die katalytische Wirkungsweise der Carboanhydrase.

### ***Experimentelle Umsetzung***

Geräte und Chemikalien: zwei 250 mL - Erlenmeyerkolben, zwei 50 mL - Messzylinder, Pasteurpipette, 1 mL - Messpipette, Peleusball, Stoppuhr, zwei Rührkerne, Magnetheizrührer,

Mineralwasser angereichert mit Kohlensäure, Phenolrot – Lösung (0,1 g Phenolrot in 20 mL Ethanol und 80 mL Wasser), Pufferlösung pH = 10 (Borsäure/Kaliumchlorid/Natronlauge von Merck® Best. Nr. 109849), Carboanhydrase – Lösung (25 mg/100 mL Wasser).

Durchführung: 25 mL Pufferlösung werden mit einem Messzylinder in den 250 mL - Erlenmeyerkolben vorgelegt und mit 5 Tropfen Phenolrot – Lösung als Indikator versetzt. Unter ständigem Rühren wird 30 mL Mineralwasser zugegeben und die Zeit bis zum Farbumschlag von Rot nach Gelb gemessen. Parallel dazu wird in einem zweiten Erlenmeyerkolben 25 mL Pufferlösung vorgelegt, die mit 1 mL Carboanhydraselösung und 5 Tropfen Phenolrotlösung versetzt ist. Unter ständigem Rühren wird nun ebenfalls 30 mL Mineralwasser zugegeben und die Zeit bis zum Farbumschlag von Rot nach Gelb gemessen.

Beobachtungen: Die Zeit bis zur Farbänderung von Rot nach Gelb ist unterschiedlich. Mit Carboanhydrase beträgt die Zeit 2 s, ohne Carboanhydrase 40 s.

Deutungen: Im Mineralwasser liegen im Gleichgewicht Oxoniumionen, Hydrogencarbonationen und physikalisch gelöstes Kohlenstoffdioxid vor. Die Oxoniumionen neutralisieren die Hydroxidionen der Pufferlösung. Da die Stoffmenge der zugesetzten Oxoniumionen größer ist als die Stoffmenge der in der Pufferlösung enthaltenen Hydroxidionen, wird die Lösung sauer. Der Indikator ändert seine Farbe nach Gelb. Die Bildung der Oxoniumionen aus der Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Wasser wird beschleunigt durch die Carboanhydrase. Die Carboanhydrase bindet Kohlenstoffdioxid und Wasser als Substrat in einem Enzym – Substrat – Komplex und katalysiert damit die Bildung von Kohlensäure. Die Dissoziationsstufe der Kohlensäure ist vom pH – Wert des Mediums abhängig. So entstehen als Reaktionsprodukte im neutralen Bereich überwiegend Hydrogencarbonationen und im alkalischen Bereich Carbonationen.

#### Weiterführende Aufgaben

1. Erläutern Sie die Vorgänge in den Erythrozyten der Lungenkapillaren bei einer CO<sub>2</sub> – Abgabe.
2. Diamox® ist ein Medikament, das zur Aufrechterhaltung des Harnflusses bei drohendem Nierenversagen verabreicht wurde. Der Wirkstoff hemmt die Carboanhydrase. Erklären Sie die Wirkung von Diamox®.
3. Erklären Sie, warum chronisches Erbrechen zu einer Alkalose im Blut führen kann.

#### Antworten:

ad 1. In den Lungenkapillaren katalysiert die Carboanhydrase die Reaktion von Hydrogencarbonationen und Oxoniumionen zu Kohlensäure. Kohlenstoffdioxid wird beim

Ausatmen dem Kohlensäuregleichgewicht in den Erythrozyten entzogen und durch die Katalyse der Carboanhydrase nachgeliefert.

ad 2. Die Carboanhydrase befindet sich in den Wandzellen der Nierenkanälchen. Dort bindet sie aus dem Primärharn Hydrogencarbonat und Oxoniumionen, so dass Kohlenstoffdioxid entsteht, das durch die Wandzellen diffundiert und erneut zu Hydrogencarbonat und Oxoniumionen umgewandelt wird. Hydrogencarbonat wandert im Konzentrationsgradienten ins Blut. Wird Carboanhydrase durch Diamox® gehemmt, fehlt die Rückgewinnung von Hydrogencarbonat ins Blut. Eine Acidose stellt sich ein (vgl. Anhang Abbildungen S. 2 Abb. 1-3: Wirkungen der Carboanhydrase in der Bauchspeicheldrüse, im Magen und in der Niere).

ad 3. Speisebrei löst die Bildung von Salzsäure aus. Dabei werden in den Belegzellen der Magenschleimhaut mit Hilfe der Carboanhydrase Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen gebildet. Die Oxoniumionen wandern gegen das Konzentrationsgefälle in den Magenraum, die Hydrogencarbonationen ins Blut. Ein gefüllter Magen signalisiert der Bauchspeicheldrüse ein Sekret zu bilden, das hydrogencarbonathaltig ist und in den Darm sezerniert wird. Gleichzeitig werden Oxoniumionen ins Blut abgegeben. Wird mehrfach erbrochen, bedeutet das für die Wandzellen der Ausführungsgänge in der Bauchspeicheldrüse, dass kein Hydrogencarbonat und keine Oxoniumionen gebildet werden. Das Blut wird daher nicht mit Oxoniumionen aus der Bauchspeicheldrüse angereichert, die unter normalen Bedingungen die Hydrogencarbonationen, die von den Belegzellen in der Magenschleimhaut abgegeben werden, neutralisieren. Eine Alkalose stellt sich ein.

### 3.3.4 Anmerkungen zur Erprobung

Die Erprobung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ fand in den beiden Lerngruppen KSN<sup>3</sup> und HOF zu Beginn des 12. Jahrganges statt. Beide Gruppen waren nach Klasse 11 neu zusammengestellt. Keiner der Probanden war vorher nach der Konzeption *Chemie im Kontext* unterrichtet worden (vgl. Anhang S. L 70). Zwei Schülerinnen aus der Gruppe HOF fassten ihre Ein-drücke zu der für sie neuartigen Unterrichtskonzeption wie folgt zusammen:

R.: „Wir wollten Ihnen nur sagen, dass wir ziemlich viel arbeiten mussten. Drei bis vier Stunden für ein Protokoll, das war die Regel. Es machte ja Spaß. Wir haben den Sachverhalt zum ersten Mal selbständig erarbeitet, aber es war ausgesprochen zeitaufwendig“.

S.: „Zum ersten Mal habe ich gemerkt, dass ich selbständig etwas erarbeitet habe. Vielleicht wäre es besser gewesen, die Einheit hätte später stattgefunden. Der Wechsel von 11 nach 12 war zu abrupt. Andererseits ist das Semester zu kurz, wann hätten wir es machen sollen? Außerdem glaube ich, war es eine optimale Vorbereitung zur Facharbeit“.

---

<sup>3</sup> KSN und HOF: Lerngruppen am THG in Göttingen

R.: „Das Projekt war toll, das hat viel Spaß gemacht. Ich musste viel arbeiten. Noch Sonntagabend habe ich an den Protokollen geschrieben. Die Aufgaben waren in ihrem Schwierigkeitsgrad gerade angemessen. Das macht dann Spaß sie zu lösen. Im Rückblick gesehen hat mir das Projekt ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ mehr Spaß gemacht als der Unterricht danach“.

Die Schülerinnen haben die für sie neuartige Unterrichtsorganisation positiv wahrgenommen. Eigenständiges Arbeiten, positive Erlebnisqualität, zeitaufwendige Anstrengungen für Aufgaben mit angemessenem Schwierigkeitsgrad und ein Kalkül der Konsequenzen für die bevorstehende Facharbeit waren die Faktoren, die ihr kontextualisiertes Lernen bestimmt haben.

Die Erprobung in der Gruppe WLK<sup>4</sup> fand in einem Kurs statt, der aus 14 Grundkursschülern und 6 Leistungskursschülern bestand. Die Leistungskursschüler hatten eine Doppelstunde mit den Grundkursschülern gemeinsam. Nach Aussage des betreuenden Kollegen gab es bei der Auswertung der Ergebnisse insbesondere bei den Grundkursschülern Verständnisschwierigkeiten. Die Schülerinnen betonten, sie hätten Physik bewusst abgewählt und bedauerlicher Weise wären die zu lösenden Probleme im physikalischen Bereich (vgl. Anhang S. F 13).

#### ***Anmerkungen zum Gleichgewichtskonzept***

In der Gruppe WLK lösten die Sättigungskurven von Hämoglobin und Myoglobin Verständnisschwierigkeiten aus, die nicht so einfach geklärt werden konnten, da der Unterrichtende sich nach eigener Einschätzung in seinen biologischen Kenntnissen überfordert sah. Der Kollege fragt nach, ob es nicht sinnvoll sei, die Diskussion der Sättigungskurven wegzulassen, da sie aus seiner Sicht zusätzliche Verständnisprobleme bei den Schülern hervorrufe? Die Verfasserin hält die Diskussion der Sättigungskurven von Hämoglobin und Myoglobin aus folgenden Gründen für sinnvoll:

Die Sättigungskurven können auf unterschiedlichem Schwierigkeitsniveau diskutiert werden. Dargestellt wird die Abhängigkeit der Sauerstoffsättigung der Proteine in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck in unterschiedlichen Kennlinien. Die Kennlinie von Myoglobin nimmt einen hyperbelartigen Verlauf, die Kennlinie von Hämoglobin ist s – förmig. Beide Kurven nähern sich bei hohen Partialdrücken einem Grenzwert an. Der s – förmige Verlauf der Kurve verdeutlicht die physiologischen Vorteile, die das Hämoglobinmolekül gegenüber dem Myoglobinmolekül besitzt. Hämoglobin ist in der Lage äußerst effektiv den Sauerstoff im Muskel und in andere Gewebe abzugeben. Arbeitet der Muskel, so beträgt der Partialdruck des Sauerstoffs etwa 1,5 kPa und das bedeutet, dass nur etwa 10% des Hämoglobins als Oxihämoglobin vorliegt. Ruht der Muskel, beträgt der Sauerstoffpartialdruck etwa 5 kPa und die Sättigung des Hämoglobins beträgt dementsprechend 75%. Hämoglobin ist also in der Lage Sauerstoff abzugeben und dem Gewebe zur Verfügung zu stellen, wenn der Partialdruck von 5 kPa auf 1,5 kPa fällt.

---

<sup>4</sup> WLK: Lerngruppe in Bückeberg

Wird von den Schülern nachgefragt, welche Bedingungen dafür verantwortlich sind, dass die Sauerstoffbeladung je nach Transportprotein quantitativ unterschiedlich beschrieben werden muss, bietet es sich an, ein Erklärungsmodell zu diskutieren, das mit den experimentellen Daten vereinbar ist. In einem in der Literatur veröffentlichtem Erklärungsmodell wird angenommen, dass die Sauerstoffmoleküle nicht gleichzeitig sondern nacheinander gebunden werden. Anders formuliert könnte das heißen: Je nachdem, ob Hämoglobin unbeladen ist oder ein, zwei oder drei Sauerstoffmoleküle gebunden hat und dann mit einem weiteren Sauerstoffmolekül reagiert, handelt es sich um ein anderes Gleichgewicht. Da die Bindung des Sauerstoffs unterschiedlich stark ist, besitzt jedes Gleichgewicht eine andere Gleichgewichtskonstante.

Sollte nach der Gleichgewichtskonstanten gefragt werden, die die entsprechende Sauerstoffbeladung der Moleküle charakterisiert, dann könnte der Zusammenhang zwischen dem Kurvenverlauf und der Gültigkeit des Massenwirkungsgesetzes aufgedeckt werden. Ein hyperbelähnlicher Verlauf der Sättigungskurve eines sauerstofftransportierenden Moleküls ist immer dann zu erwarten, wenn es sich bei der Beladung mit Sauerstoff um eine Gleichgewichtsreaktion handelt, die dem MWG folgt. Damit kann die Sauerstoffbeladung des Myoglobins mathematisch durch das MWG beschrieben werden, die Beladung des Hämoglobins nicht (vgl. S. 19).

Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wurde zuerst in der Gruppe HOF erprobt. Formulierungen in der Klausur und in den Protokollen weisen darauf hin, dass es insbesondere schwächeren Schülern schwerfällt, die Systemeigenschaft eines chemischen Gleichgewichtes in neuen Zusammenhängen anzuwenden. Nicht immer scheint klar zu sein, dass zwei Phasen zu unterscheiden sind. Dazu gehört einerseits die Einstellung des Gleichgewichtes und andererseits der Gleichgewichtszustand selbst. Der Prozess, der im Gleichgewicht endet, und der Störung entgegenwirkt, wird häufig nicht als Teilreaktion gesehen, die auch im Gleichgewicht stattfindet. Damit scheint auch nicht deutlich zu sein, dass von den beiden Reaktionen im Gleichgewicht die eine Reaktion die Rückreaktion der anderen ist und dass bei einer Störung die beiden Teilreaktionen nicht mehr gleichberechtigt ablaufen, sondern die Teilreaktion bevorzugt ist, die der Störung entgegenwirkt. Diese Einsicht der Untersuchenden führte dazu, dass in den nachfolgenden Erprobungen in den Gruppen KSN und WLK zusätzlich eine softwareunterstützte Visualisierung (vgl. Krilla & Ralle 2001, Möllenkamp et al. 2001 S. 224 – 229) erfolgte, die die Systemeigenschaft des Gleichgewichtes auf der Teilchenebene verdeutlicht.

### ***Anmerkungen zur Gruppenarbeit und zu den Medien***

Von allen Kollegen wurde die nicht immer gelungene Zusammenarbeit in den Gruppen angesprochen. Ein Vorschlag, der gemacht wurde, um Fehlentwicklungen in der Gruppenarbeit vorzubeugen, war ein festgelegter Rollentausch während der Stationenarbeit. Ein zweiter Vorschlag war, die Gruppenarbeit in der aktuellen Lernphase zu evaluieren. Zur Selbstevaluation

der Gruppe könnte nach Aussage eines Kollegen ein kurzer standardisierte Fragebogen hilfreich sein.

Die Arbeit in den Lernstationen war mit einer Internetrecherche verknüpft. Zur Lösung der Aufgaben mussten die aufgerufenen Informationen hinzugezogen werden. Das Problem war, dass in der Lernphase die angegebenen Internetadressen zum Teil schon veraltet waren und nicht mehr aufgerufen werden konnten (vgl. Anhang F 17). Angeregt wurde, zusätzliche Informationen auf einer CD ROM zur Verfügung zu stellen. Nach Einschätzung der Kollegen ist der Einsatz von multimedialen Informationsquellen im Chemieunterricht lohnend, wenn es sich um zusätzliche Informationen handelt und wenn es um die individuelle Aufarbeitung von Defiziten sowie um die Visualisierung von Präsentationen geht.

### **3.3.5 Zusammenfassung**

Wenn Lernen ein zirkulärer Prozess ist, der zwischen Lernenden und ihre Umgebung stattfindet, so wie es die moderat konstruktivistische Sichtweise fordert, wenn also Informationen nur dann zu Wissen verarbeitet werden, wenn der Informationsgehalt sich in vorhandenes Wissen integrieren lässt und vom Lernenden als bedeutsam eingeschätzt wird, dann muss eine Lernumgebung gewählt werden, die genannte Bedingungen erfüllt. Die Lernstationen zum Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ bieten einen Raum für eigenverantwortliches Lernen im Kontext und im sozialen Austausch. Jede Lernstation zeigt einen Aspekt im Kontext. Die Kontextbezüge werden jeweils in einer kurzen Information und in einer Leitfrage zur Lernstation hergestellt.

- Woher kommen nach dem Tauchgang die Stickstoffblasen im arteriellen Blut?
- Warum wölbt sich das Trommelfell nach innen, wenn Sie auftauchen?
- Warum kann eine Hyperventilation vor dem Tauchgang eine plötzliche Ohnmacht auslösen?
- Warum hilft eine Sauerstoffüberdrucktherapie im Fall einer Dekompressionskrankheit?
- Welche Faktoren bestimmen den pH – Wert des Blutes?
- Wie lässt sich die Höhenkrankheit erklären?
- Warum bleibt der pH – Wert des Blutes trotz Säureeintrages konstant?

Im Verlauf des Lernzyklus bleibt somit der Bezug zwischen dem Kontextaspekt und den zu erarbeitenden, fachsystematischen Inhalten erhalten. Eine horizontale Vernetzung der fachsystematischen Inhalte ist gegeben. Untersucht und erklärt werden Löslichkeitsgleichgewichte der Atemgase. Die Protolyse der Kohlensäure und die wechselseitige Beeinflussung mit dem Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid ist unter unterschiedlichen Aspekten zu erklären. Um über die Gleichgewichtslage, die sich nach einer Störung einstellt, eine Vorhersage treffen zu können, war vor der Unterrichtseinheit das Le Chatelier Prinzip vorgestellt worden. Das Henrysche - Gesetz und das Massenwirkungsgesetz, die Gesetzmäßigkeiten, die quantitativ das chemische Gleichgewicht beschreiben, werden eigenständig aus dem vorgegebenen Informationsmaterial erarbeitet und durch die quantitativen Messergebnisse bestätigt.

Die Lernstation ‚Puffer im Vergleich‘ bietet eine Lernumgebung mit Methodenmix. Experimentelles Arbeiten und Unterrichtsgespräch wechseln mit Partnerarbeit und Lehrervortrag ab. Die Problemorientierung richtet sich auf die Auswertung der Messwerte. Die Kennlinie der potentiometrischen Titration einer hydrogencarbonathaltigen Infusionslösung mit Salzsäure zeigt, dass die Protolyse der Kohlensäure dem Massenwirkungsgesetz folgt. Bestimmt man zusätzlich den Neutralisationsgrad, so wird deutlich, dass die Änderung des pH – Wertes umso größer ist, je mehr sich die Stoffmengen von Hydrogencarbonat und korrespondierender Kohlensäure unterscheiden.

Die Botschaft, die sich aus der konstruktivistischen Perspektive des Lernens ergibt, heißt verkürzt formuliert: Informationen werden immer dann zu Wissen verarbeitet, wenn sie hilfreich, neu und anschlussfähig sind. Für den Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ heißt das: Nur wenn der Kontext als hilfreich angesehen wird, das zu erklären, was man wissen will oder was man schon immer wissen wollte, wenn die Erklärungen für die unterschiedlichen Phänomene aufeinander aufbauen und miteinander vernetzt sind und auf ein adäquates Vorwissen basieren, dann sind notwendige Bedingungen geschaffen, die den Lernprozess in Gang setzen, so dass die Informationen zu rekonstruierbarem Wissen verarbeitet werden können. Die Lernumgebung erfüllt aus der Lehrerperspektive folgende Bedingungen:

Sie gibt Raum für die Wahrnehmung von Körperreaktionen beim Tauchen und sie ermöglicht Lernen im sozialen Austausch. Ihr Lernangebot ist

- kontextualisiert,
- vernetzt,
- baut auf vorhandenem Wissen auf und
- erweitert vertiefend das Gleichgewichtskonzept.

### **3.4 Der Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘**

#### **3.4.1 Basiskonzepte zum Kontext ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘**

##### **Beiträge zum ‚Struktur – Eigenschafts – Konzept‘**

Das Fachwissen, das für die Erklärung des Kontextes ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ nötig ist, knüpft an Fachinhalte an, die in früheren Kontexten erworben worden sind. Kenntnisse über die Eigenschaften von Carbonsäuren und Carbonsäureestern sind die Voraussetzung zum Verständnis für die chemischen Eigenschaften der Lipide. Lipide, zu denen Fettsäuren, Triacylglycerine, Phospholipide und Cholesterin gehören, sind eine Klasse von Biomolekülen, die aus unterschiedlichen Blickwinkeln zwei Aspekte des Kontextes ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ fachlich bestimmen. Angeknüpft wird an die beiden Kontexte, die in Klasse 11 erarbeitet werden: ‚Fruchtig natürlich – natürlich fruchtig‘ und ‚Essig, der saure Bruder des Weines‘ (Krilla & Ralle 2001). Die beiden Kontextaspekte ‚Fett – Leidensdruck und Lebensgarant‘ sowie ‚Fettfallen‘, die an Struktur und Eigenschaftsbetrachtungen in Klasse 11 anknüpfen, enthalten Phänomene, die nur mit hinreichenden Kenntnissen über hydrophile Wechselwirkungen erklärt werden können. Vorausgesetzt wird ein Wissensfundament, das den räumlichen Bau eines Wassermoleküls, seine Bindungen, die damit verknüpften Dipoleigenschaften und die intermolekularen Wechselwirkungen umfasst. Enthalten Fettmoleküle polare und unpolare Teile, so können in wässriger Lösung unterschiedliche Raumanordnungen eingenommen werden. Bevorzugte Strukturen der meisten Lipide, die polare und unpolare Teile besitzen und in wässrigen Lösungen unter natürlichen Bedingungen auftreten, sind Micellen. Dabei ordnen sich die unpolaren Teile so an, dass sie die kleinste mögliche Oberfläche dem Lösungsmittel bieten. Die polaren Teile sind den Wassermolekülen zugewandt und ermöglichen damit die optimale Ausbildung von intermolekularen Kräften mit den Lösungsmittelmolekülen. Salze der Fettsäuren bilden in wässriger Lösung derartige kugelige Anordnungen.

Lipide, die im Organismus besonders häufig auftreten, sind Phospholipide, Cholesterin und Cholesterinester. Bei den Phospholipiden sind zwei aufeinanderfolgende Hydroxylgruppen des Glycerins mit je einer Carboxylgruppe einer Fettsäure verestert. Die dritte Hydroxylgruppe bildet dagegen mit einem Phosphorsäuremolekül eine Esterbindung aus. Sie wird auch als polare Kopfgruppe bezeichnet und ist immer der wässrigen Phase zugewandt. Die räumliche Anordnung der Phospholipide in wässriger Lösung kann sowohl eine Lipiddoppelschicht wie auch eine Kugel sein.

Eine kugelige Anordnung, die Phospholipide in wässriger Lösung freiwillig eingehen und die aus unterschiedlichen Molekülarten zusammengesetzt ist, sind die Chylomikrone. Die Oberfläche eines Chylomikrons wird von einer Schicht aus Phospholipiden bedeckt, deren polare Kopfgruppe der

wässrigen Phase zugewandt ist. Im Gegensatz zu Micellen befinden sich im Inneren der Kugel Triacylglycerine. Sie machen bis zu 80% der Gesamtmasse aus. Hinzu kommen noch als weitere Lipide Cholesterin und Cholesterinester (vgl. Anhang Abbildungen S. 5, Abb.18, 19 und 20). Cholesterinester befinden sich bevorzugt im Inneren der Kugel, unverestertes Cholesterin dagegen an der Kugeloberfläche zwischen den Phospholipiden. Zusätzlich ragen lipidbindende Proteine aus der Oberfläche heraus. Sie dienen zur Signalaufnahme.

Weitere komplexe, kugelige Anordnungen, die von Phospholipiden eingegangen werden, und die sich in ihrer Lipid-, Protein- und Cholesterinzusammensetzung und damit in ihrer Dichte unterscheiden, sind die Partikel VLDL (very low – density lipoprotein), LDL (low – density lipoprotein) und HDL (high – density lipoprotein). Chylomikrone entstehen bei der Fettaufnahme in den Dünndarmzotten und werden an die Lymphe und von dort ins Plasma abgegeben. VLDL – Partikel entstehen in der Leber und transportieren von dort synthetisierte Triacylglycerine und Cholesterin zu den verschiedenen Gewebearten. LDL – Partikel entstehen beim Abbau von VLDL – Partikeln. Durch den Verlust von Triacylglycerinen werden VLDL - in LDL – Partikel umgewandelt. Sie sind besonders cholesterinreich. HDL – Partikel sichern den Cholesterinrücktransport von den Gewebeformen zur Leber (vgl. Anhang Abbildungen S.5 Abb.17, 18, 19 und 20). Allen räumlichen Anordnungen ist gemeinsam, dass die Kräfte, die unpolare Molekülteile der Lipide zusammenhalten, auf schwachen Anziehungskräften zwischen Atomen beruhen.

Nicht nur die besonderen Eigenschaften von Lipiden als Biomoleküle werden erarbeitet. Mit einbezogen sind auch die Proteine in ihren unterschiedlichen Funktionen. Der Kontextaspekt ‚Abgemagert und angeschwollen‘ verweist auf die besondere Funktion der Serumproteine. Drei Kontextaspekte ‚Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht‘, ‚Abgemagert und angeschwollen‘, ‚Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe‘ thematisieren Enzymreaktionen.

### **Beiträge zum Donator – Akzeptor – Konzept**

Fachlich neu sind nicht nur die räumlichen Anordnungen der verschiedenen Biomoleküle in wässriger Lösung. Neu sind auch die vorgestellten quantitativen Methoden. Die Iodzahlbestimmung<sup>5</sup> ist ein Maß für die ungesättigten Fettsäuren im Fett. Das Messprinzip zeichnet sich dadurch aus, dass die zu untersuchende Lösung mit einem Überschuss an Bromlösung versetzt wird. Das überschüssige Brom reagiert mit einer äquivalenten Stoffmenge von Kaliumiodid. Das gebildete Iod wird durch iodometrische Titration mit Natriumthiosulfat bestimmt. Das quantitative Verfahren zur Bestimmung der ungesättigten Fettsäuren setzt ein Fundament an Wissen voraus, das in der Domäne ‚Donator – Akzeptor – Konzept‘ einzuordnen ist. Bekannt sein müssen folgende

---

<sup>5</sup> Die Iodzahl bezeichnet die Menge an Halogen in Gramm bezogen auf das Element Iod, die von 100 g Öl gebunden wird.

Elemente: Redoxreaktionen, ihre Formulierung mit Hilfe von Oxidationszahlen und das Normalpotenzial als Maß für die Elektronenakzeptortendenz bzw. Elektronendonatortendenz der Teilchen im betrachteten System.

Die Bestimmung der Verseifungszahl ist eine weitere Methode, mit deren Hilfe ein Fett gekennzeichnet werden kann. Die Verseifungszahl<sup>6</sup> ist das Maß für die in einem Fett enthaltenen freien und gebundenen Säuren. Dabei wird die Fettprobe mit einem Überschuss ethanolischer Kaliumhydroxidlösung verseift und die verbleibende Menge an Kaliumhydroxid wird titrimetrisch bestimmt. Die Verseifungszahl ist abhängig von der Kettenlänge der Fettsäuren. Sie ist umso größer, je höher der Anteil von kurzkettigen Fettsäuren ist. Das Messprinzip fußt auf einem Wissensfundament, das auch in der Domäne ‚Donator – Akzeptor – Konzept‘ einzuordnen ist. Gemeint sind in diesem Fall aber keine Elektronenübergänge, gemeint sind Protonenübergänge. Damit knüpft die Charakterisierung des Fettes an Fachinhalte an, die auch im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ (Hoffmann & Ralle 2000 S. 16 - 22) thematisiert werden. Das Phänomen der Hyperventilation, das einen Aspekt des Kontextes ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ darstellt, kann fachlich nur hinreichend erklärt werden, wenn die wechselseitige Beeinflussung zeitgleich vorliegender Säure – Base – Gleichgewichte zur Erklärung herangezogen wird. Bei der Titration einer starken Base mit einer starken Säure, so wie die Bestimmung der Verseifungszahl eines Fettes es verlangt, handelt es sich im Gegensatz zu den wechselseitig sich beeinflussenden Kohlensäuregleichgewichten im menschlichen Körper um eine vollständig ablaufende Säure – Base – Reaktion, die nicht im Gleichgewicht endet. Das Messprinzip zur Bestimmung der Verseifungszahl fußt im wesentlichen auf dem Protonendonator – Akzeptor – Konzept und berührt das Gleichgewichtskonzept nur randständig: Die Neutralisationsreaktion verläuft vollständig und endet nicht im Gleichgewicht.

### **Beiträge zum Energie – Entropie – Konzept**

Der Kontextaspekt ‚Fettfalle‘ enthält außer den Struktur – Eigenschaftsbetrachtungen von Lipiden und zwei analytischen Verfahrenstechniken noch einen weiteren Fachaspekt. Quantitativ bestimmt wird die Verbrennungsenthalpie eines Fettes. Vorausgesetzt werden Kenntnisse aus der Wärmelehre. Aus der Temperaturdifferenz, die sich durch das verbrannte Fett ergibt, werden die Verbrennungsenthalpie und der chemische Brennwert bestimmt. Damit wird eine weitere Domäne des chemischen Fachwissens angesprochen: das *Energie – Entropie – Konzept*. Dieses Basiskonzept fasst die Wissens Elemente zusammen, die sich auf die herkömmlichen Lehrplaninhalte zum Energiebegriff beziehen. In drei veröffentlichten Lernzyklen - ‚Treibstoffe in der Diskussion‘, ‚Energieverlust durch Benzinverbrauch‘ und ‚Autoantrieb der Zukunft‘ (Huntemann & Parchmann 2000 S. 131 – 136, Huntemann et al. 2000 S. 22 – 29) - werden Fragen

---

<sup>6</sup> Die Verseifungszahl entspricht der Masse Kaliumhydroxid in mg, die zur Verseifung von einem Gramm Fett erforderlich ist.

aufgeworfen, die nur hinreichend mit der Reaktionsenthalpie eines Systems, seinen Energieumwandlungen und seinem Energieaustausch mit der Umgebung beantwortet werden können. Auf diesen Wissensfundus bauen Erklärungen und Berechnungen zur Verbrennungsenthalpie von Fetten auf.

Ödeme sind Phänomene, deren Ursachen mit den Bedingungen einher gehen, die eine freiwillige Gleichverteilung von Wassermolekülen im menschlichen Körper verhindern. Der Kontextaspekt ‚Abgemagert und angeschwollen‘ thematisiert die Wasseransammlungen im Gewebe. Die Entropie wird als Maß für die Gleichverteilung der Teilchen vorgestellt. Der eher beschreibende Aspekt der Entropieänderung wird durch ein Gedankenexperiment zur Gleichverteilung von Gasteilchen ergänzt. Vorgestellt wird die Entropie als eine Größe, die wie andere Größen eines Systems eine Einheit besitzt und sich additiv verrechnen lässt.

So wie eine freiwillige Gleichverteilung der Wassermoleküle durch die Bedingungen, die Ödeme verursachen, verhindert wird, ist auch die Anordnung von Lipiden in wässriger Lösung mit einer Entropieabnahme verknüpft: Die Wassermoleküle in unmittelbarer Umgebung der Lipide sind in ihren möglichen Orientierungen stark eingeschränkt. Dies führt zu einer hochgradigen Ordnung der Wassermoleküle um ein Lipidmolekül. Bilden sich Micellen aus, sind alle hydrophoben Gruppen vom Wasser abgesondert, die Ordnung der umgebenden Wassermoleküle ist damit geringer im Vergleich zu einer Dispersion von Lipidmolekülen in Wasser (vgl. Lehninger et al. 1998 S. 96 – 97).

### **Beiträge zum Reaktionsgeschwindigkeit - Konzept**

Die vier übrigen Aspekte des Kontextes ‚Mangel und Überfluss‘ (‚Der Traum vom Verzicht ohne Verzicht‘, ‚Abgemagert und angeschwollen‘, ‚Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe‘, ‚Antioxidanzien‘) besitzen eine Gemeinsamkeit. Sie enthalten Elemente des Basiskonzeptes *Reaktionsgeschwindigkeit*. Qualitativ und quantitativ behandelt werden enzymatisch katalysierte Reaktionen. Die qualitativen Aspekte und die entsprechenden Erklärungen auf der Teilchenebene werden im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ am Beispiel der Carboanhydrase vorbereitet (vgl. Kapitel 3.3.3 Abstraktion und Vernetzung, S. 50).

Neu sind die quantitativen Aspekte im Rahmen von kinetischen Betrachtungen. Ein Maß für die Aktivität eines Enzyms ist die Reaktionsgeschwindigkeit, mit welcher das Enzym das Substrat umsetzt. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird am Stoffumsatz pro Zeiteinheit gemessen, wobei entweder die Abnahme der Konzentration des Substrates in der Zeiteinheit oder die Zunahme der Konzentration des Produktes pro Zeiteinheit unter standardisierten Reaktionsbedingungen gemessen wird. Nimmt die Konzentration des Substrates pro Zeiteinheit ab, ergibt die Auftragung der Messwerte im Konzentration – Zeit – Diagramm eine Exponentialfunktion. Im Anfangsteil lässt sich der Graph im  $c - t$  – Diagramm wie eine Gerade behandeln, so dass

Durchschnittsgeschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit nahezu identisch sind. Der Differenzenquotient, also die Durchschnittsgeschwindigkeit, ist ein übliches Maß für die Enzymaktivität.

Um die Abhängigkeit zwischen der Enzymaktivität und der Substratkonzentration zu erfassen, ist ein herkömmliches Verfahren, die Anfangsgeschwindigkeiten der Reaktion bei unterschiedlichen Substratmengen in definiertem Volumen zu bestimmen. Dabei ist die Substratkonzentration höher, zum Teil wesentlich höher als die Enzymkonzentration, selbst wenn die Konzentration des Substrates als niedrig oder relativ niedrig beschrieben wird (Lehninger et al. 1998 S. 243). Die Enzymkonzentration ist während des Versuches konstant. Wird die Enzymaktivität als Konzentrationsänderung pro Zeiteinheit über der Substratkonzentration aufgetragen, ergibt sich eine streng monoton steigende Kurve mit nach rechts gebogenem, hyperbelähnlichem Verlauf und einer asymptotischen Annäherung an einen Grenzwert  $v_{\max}$ . Liegt ein Graph im Enzymaktivität – Substratkonzentration – Diagramm in so beschriebener Form vor, so folgt die enzymatisch katalysierte Reaktion der Michaelis – Menten – Kinetik.

### ***Michaelis – Menten – Kinetik***

Der hyperbelähnliche Graph im  $v - c_{\text{Substrat}}$  – Diagramm war die Grundlage für die Theorie von Leonor Michaelis und Maud Menten zur enzymatischen Wirkungsweise. In dem von ihnen geforderten Reaktionsmechanismus gehen sie davon aus, dass das Enzym in einem schnellen Schritt, der normalerweise zu kurz ist für herkömmlich Messmethoden, mit dem Substrat reagiert, allerdings nicht vollständig.



Die Bildung des Enzym – Substrat – Komplex endet in einem Fließgleichgewicht, bei dem in definierten Konzentrationen Enzym, Substrat und Enzym – Substrat – Komplex gleichzeitig vorliegen. Angenommen wird, dass die Konzentration des Zwischenproduktes, also die Konzentration des ES – Komplexes, konstant bleibt. Genauso soviel wie in einem offenen System zerfällt, wird gemäß der Fließgleichgewichtsbedingungen auch nachgebildet (Lehninger et al. 1998 S. 243, Rehner et al. 1999 S. 86, Stryer 1999 S. 202). In einem langsameren und damit geschwindigkeitsbestimmenden, zweiten Schritt zerfällt der Enzym – Substrat – Komplex in das freie Enzym und das Produkt. Da-raus folgt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit zur Konzentration des Enzym – Substrat – Komplexes proportional sein muss, dass es sich also um ein Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung bezüglich des Enzym – Substrat – Komplexes handelt, wenn die Konzentration des Enzyms während der Reaktion als konstant angesehen werden kann.

In einer enzymkatalysierten Reaktion existiert nach der Modellvorstellung von Michaelis und Menten das Enzym zu jedem Zeitpunkt in zwei Formen: in der ungebundenen, freien Form und im Enzym – Substrat – Komplex. Ist die Substratkonzentration gering, liegt der größte Teil des

Enzyms in der ungebundenen Form vor. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist dann proportional zur Substratkonzentration, denn die Substratkonzentration ist begrenzender Faktor für die Konzentration des Enzym – Substratkomplexes. Anders formuliert: Im Reaktionsgemisch liegt das ungebundene Enzym im Überschuss vor, die Konzentration des Enzym – Substrat – Komplexes und die Konzentration des Substrates verhalten sich zueinander proportional, denn das Gleichgewicht wird mit zunehmender Substratkonzentration zugunsten des Enzym – Substrat – Komplexes verschoben.

Die katalysierte Reaktion erreicht ihre maximale Anfangsgeschwindigkeit, wenn alle Enzymmoleküle in Enzym – Substrat – Komplexe überführt sind. Eine weitere Erhöhung der Substratkonzentration hat keinen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Der Sättigungseffekt ist ein Erkennungsmerkmal der enzymatischen Katalyse und erklärt das Plateau der Kurve im  $v - c_{\text{Substrat}}$  – Diagramm.

Mathematisch wird die Abhängigkeit zwischen Anfangsgeschwindigkeit und Substratkonzentration durch die Michaelis – Menten – Gleichung beschrieben (vgl. Lehninger et al. 1998 S. 242 – 250).

Die Gesamtreaktion reduziert sich auf folgendes Reaktionsschema:



$k_1$  : Geschwindigkeitskonstante für die ES - Komplexbildung aus E und S

$k_{-1}$  : Geschwindigkeitskonstante für den ES - Komplexzerfall in E und S

$k_2$  : Geschwindigkeitskonstante für den ES - Komplexzerfall in E und P

$k_{-2}$  : : Geschwindigkeitskonstante für die ES - Komplexbildung aus E und P

In der Anfangsphase kann die Rückreaktion, also die erneute Bildung des Komplexes aus Enzym und Produkt vernachlässigt werden.

Für die Anfangsgeschwindigkeit gilt:

$$v_0 = k_2 \cdot c_{ES}$$

Da die Konzentration des Enzym – Substrat – Komplexes nicht so ohne weiteres gemessen werden kann, wird ein alternativer Ausdruck gefunden.

Folgende Größen werden verwandt:

$c_{E1}$ : Konzentration des gesamten Enzyms, also die Summe der Konzentrationen von gebundenem und freiem Enzym

$c_{E1} - c_{ES}$  Die Konzentration des ungebundenen Enzyms ergibt sich daher als Differenz.

Da die Konzentration des Substrates wesentlich höher ist als die Gesamtkonzentration des Enzyms, kann die zu jedem Zeitpunkt an das Enzym gebundene Substratmenge gegenüber der Gesamtkonzentration des Substrates vernachlässigt werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit für die Bildung des Enzym – Substrat – Komplexes lautet:

$$v_{ES} = k_1 (c_{E1} - c_{ES}) \cdot c_S$$

Sie ist also abhängig von der Konzentration des ungebundenen Enzyms und der Konzentration des Substrates. Die Geschwindigkeit des Zerfalls des Enzym – Substratkomplexes ist davon abhängig, wie hoch die Konzentration des Enzym – Substrat – Komplexes ist. Die momentane Konzentration ist von dem Ausmaß der Rückreaktion, also der Rückbildung von Enzym und Substrat abhängig. Geht man davon aus, dass die Bildung des Enzym – Substrat – Komplexes und sein Zerfall in gleicher Geschwindigkeit ablaufen, ergibt sich:

$$k_1 (c_{E1} - c_{ES}) \cdot c_S = k_{-1} \cdot c_{ES} + k_2 \cdot c_{ES}$$

Aufgelöst nach  $c_{ES}$  und sinnvoll umgeformt ergibt sich für die Konzentration des Enzym – Substrat– Komplexes folgender Term:

$$c_{ES} = \frac{k_1 \cdot c_{E1} \cdot c_S}{k_1 \cdot c_S + k_{-1} + k_2}$$

Werden die Geschwindigkeitskonstanten zusammengefasst, gilt:

$$c_{ES} = \frac{c_{E1} \cdot c_S}{c_S + (k_{-1} + k_2) / k_1} = \frac{c_{E1} \cdot c_S}{c_S + K_m}$$

Der Term, der die Geschwindigkeitskonstanten zusammenfasst, wird auch als Michaelis – Menten– Konstante  $K_m$  genannt.

Wird nun die Konzentration des Enzym – Substrat – Komplexes in  $v_0 = k_2 \cdot c_{ES}$  eingesetzt, ergibt sich die Gleichung für die Anfangsgeschwindigkeit. Nimmt man an, dass die Maximalgeschwindigkeit nur dann erreicht wird, wenn die Enzyme vollständig in Enzym –Substrat – Komplexe überführt sind, ergibt sich die Michaelis – Menten – Gleichung

$$v_0 = \frac{k_2 \cdot c_{E1} \cdot c_S}{K_m + c_S} = \frac{v_{\max} c_S}{K_m + c_S}$$

Es handelt sich um die Geschwindigkeitsgleichung für eine enzymkatalysierte Reaktion, bei der nur ein Substrat beteiligt ist. Alle Enzyme, bei denen die Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit von der Substratkonzentration durch eine Hyperbel beschrieben werden

kann, zeigen Michaelis – Menten - Kinetik. Die praktische Regel, dass  $K_m = c_s$ , wenn  $v_0 = \frac{1}{2} v_{\max}$ , trifft für alle Enzyme zu, die der Michaelis – Menten – Kinetik folgen.

Bei niedriger Substratkonzentration kann der Term  $c_s$  im Zähler der Michaelis – Menten – Gleichung vernachlässigt werden, und die Gleichung vereinfacht sich zu

$$v_0 = \frac{v_{\max} c_s}{K_m},$$

$v_{\max}$  und  $K_m$  sind Konstanten.  $v_0$  zeigt die beobachtete lineare Abhängigkeit von der Substratkonzentration, so wie sie typisch ist für den Anfangsteil der Kurve im  $v_0 - c_{\text{Substrat}}$  – Diagramm.

Der Wert der Michaeliskonstante  $K_m$  entspricht der Substratkonzentration, die bei halbmaximaler Geschwindigkeit benötigt wird. Ist der Wert groß, dann bedeutet das, dass die halbmaximale Geschwindigkeit erst bei einer hohen Substratkonzentration erreicht wird; ist der Wert klein, bedeutet das wiederum, dass die halbmaximale Geschwindigkeit bei geringer Substratkonzentration erreicht wird.

Ist die Konzentration des Substrates hoch, kann die Michaelis – Menten - Konstante  $K_m$  vernachlässigt werden und die Gleichung vereinfacht sich zu der Form  $v_0 = v_{\max}$ . Dies steht im Einklang mit dem Plateau der Kurve, also der asymptotischen Annäherung an den Grenzwert  $v_{\max}$ .

Die Enzymaktivität ist abhängig von der Zahl der freien Bindungsstellen im aktiven Zentrum der Enzyme. Die Reaktionsgeschwindigkeit steigt daher nicht unbegrenzt linear an, sondern nähert sich einem maximalen Wert, bei dem die Enzyme mit Substraten gesättigt sind. Ist diese Maximalgeschwindigkeit erreicht, werden immer gleich viele Substratmoleküle pro Zeiteinheit umgesetzt und die Reaktionsgeschwindigkeit bleibt konstant. Ist die Michaeliskonstante klein, bedeutet das aber auch, dass die Substratspezifität des Enzyms stark ausgebildet ist. Dementsprechend gering ist die Substratspezifität, wenn die Michaeliskonstante groß ist. Liegt ein Hemmstoff vor mit struktureller Ähnlichkeit zum Substrat, hat das zur Folge, dass Substrat und Hemmstoff um die substratspezifische Stelle konkurrieren, so dass sich der Wert der Michaelis - Konstante in Anwesenheit eines Hemmstoffes vergrößert.

Graphisch bestimmbar ist die Michaeliskonstante, wenn anstatt der Enzymaktivität ihr Kehrwert und anstatt der Substratkonzentration ebenfalls der entsprechende Kehrwert aufgetragen wird. Die Auftragung ergibt eine Gerade, deren Schnittpunkt mit der Abzisse den negativ reziproken Wert der Michaeliskonstante wiedergibt. Die Werte der Schnittpunkte mit der Abzisse sind um so kleiner, je größer die Konzentration des Hemmstoffes ist.

Die Wechselzahl, eine charakteristische Größe enzymkatalysierter Reaktionen, ist eine Geschwindigkeitskonstante einer Reaktion, die dem Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung folgt. Sie besitzt die Einheit  $s^{-1}$ . Sie gibt an, wie viele Substratmoleküle in einer gegebenen Zeiteinheit von einem einzigen Enzymmolekül in das entsprechende Produkt umgesetzt werden, wenn das Enzym gesättigt ist, also alle möglichen Bindestellen besetzt sind und kein ungebundenes Enzym mehr vorliegt. Die Wechselzahl, auch  $k_{kat}$  genannt, entspricht der Geschwindigkeitskonstanten, die den langsamsten, also den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt bestimmt. In dem Geschwindigkeitsgesetz

$$v_0 = \frac{k_2 \cdot c_{E1} \cdot c_S}{K_m + c_S} = \frac{k_{kat} \cdot c_{E1} \cdot c_S}{K_m + c_S} = \frac{v_{max} c_S}{K_m + c_S}$$

entspricht die Geschwindigkeitskonstante  $k_2$  der Geschwindigkeitskonstanten  $k_{kat}$ .

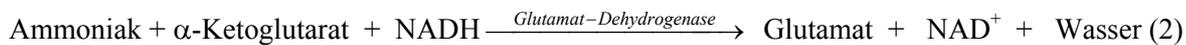
### ***Optischer Test und gekoppelt optischer Test zur Messung der Enzymaktivität***

Viele Enzyme katalysieren Reaktionen nur in Gegenwart eines speziellen Nichtprotein -Teilchens. Diese niedermolekulare Gruppe wird auch als Coenzym bezeichnet. Die Katalase beispielsweise nutzt als Coenzym  $NAD^+$  bzw.  $NADP^+$ . Nicotinamid – adenin- dinucleotid ( $NAD^+$ ) bzw. Nicotinamid – adenin- dinucleotid – phosphat ( $NADP^+$ ) übertragen Wasserstoff in Redoxsystemen. Die Enzymaktivitätsbestimmung erfolgt mit Hilfe des einfachen oder des gekoppelten optischen Tests. Beim einfachen optischen Test wird die Aktivität von Enzymen gemessen, die als Reaktionspartner  $NAD^+$  bzw.  $NADP^+$  haben. Beide Wasserstoff übertragenden Coenzyme haben in ihrer reduzierten Form als NADH bzw. NADPH ein Absorptionsmaximum bei 340 nm. Wird die Extinktionsänderung während der Reaktion gemessen, kann mit Hilfe des molaren Extinktionskoeffizienten und durch Anwendung des Lambert – Beerschen – Gesetzes die Menge des pro Zeiteinheit umgesetzten Substrates berechnet werden (vgl. Anhang Abbildungen S. 3, Abb. 11: Absorption von NADH bzw.  $NAD^+$ ). Im gekoppelten optischen Test können auch die Aktivitäten von Enzymen gemessen werden, die die Wasserstoff übertragenden Coenzyme nicht zur Umsetzung des Substrats nutzen. In diesem Fall wird eine nachgeschaltete Indikatorreaktion als Messgröße verwendet. Dabei wird ein Produkt der Messreaktion vollständig mit Hilfe des Wasserstoff übertragenden Coenzymes umgesetzt.

### ***Beispiel:***

Harnstoff wird durch Urease in Ammoniak und Kohlenstoffdioxid gespalten. Die entstehenden Ammoniumionen reagieren mit  $\alpha$ -Ketoglutarat und NADH zu Glutamat,  $NAD^+$  und Wasser. Die Reaktion wird

beschleunigt durch die Glutamat – Dehydrogenase. Je mehr Glutamat entsteht, desto geringer ist die Konzentration von NADH und desto kleiner ist der Wert der Extinktion. Sind Harnstoff und Wasser in der Reaktion 1, die reduzierte Form des Coenzym NADH und Glutamat - dehydrogenase im Überschuss vorhanden, so ist die Gesamtgeschwindigkeit der Reaktion von der Aktivität der Urease abhängig. Die quantitative Harnstoffbestimmung ist thematisiert (vgl. die Kontextaspekte ‚Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe‘ und ‚Antioxiantien‘ des Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘).



### ***Säurekatalysierte Reaktion von Kaliumiodid mit Wasserstoffperoxid***

Reaktionen können durch Enzyme beschleunigt werden. Sie können aber auch durch Säuren eine Beschleunigung erfahren. Zu den säurekatalysierten Reaktionen gehört die Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Kaliumiodid (vgl. S. 125 ff). Es handelt sich um ein Geschwindigkeitsgesetz zweiter Ordnung, erster Ordnung bezüglich der Iodionenkonzentration und erster Ordnung bezüglich der Wasserstoffperoxidkonzentration. Es gilt:  $v = k \cdot c(\text{I}^-) \cdot c(\text{H}_2\text{O}_2)$ .

Verfolgt man die Reaktion photometrisch und verwendet man die Methode der Anfangsgeschwindigkeit, so liegen im E – t – Diagramm Geraden mit unterschiedlichen Steigungen vor. Da die Steigungen der Geraden ein Maß für die Anfangsgeschwindigkeiten sind, ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Konzentration von Kaliumiodid und der Anfangsgeschwindigkeit. Ebenso zeigt sich eine lineare Abhängigkeit zwischen der Konzentration von Wasserstoffperoxid und der Reaktionsgeschwindigkeit. Hängt die Reaktionsgeschwindigkeit nur von zwei Teilchensorten ab, so müssen im geschwindigkeitsbestimmenden Schritt beide Teilchen erfolgreich kollidieren und die aus mehreren Teilschritten bestehende Reaktion einleiten. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist der langsamste, der von weiteren schnell aufeinanderfolgenden Schritten abgelöst wird. An den schnellen Teilschritten der Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Kaliumiodid sind Radikale beteiligt, die in einer Kettenreaktion weiterreagieren und letztlich kommt es zum Kettenabbruch durch Bildung stabiler Endprodukte. Die Ausgangslage der Reaktion ist ein chemisches Gleichgewicht, kein Fließgleichgewicht wie bei der enzymkatalysierten Reaktion. In einer sehr schnell ablaufenden und daher nicht messbaren Reaktion lagert sich ein Proton an den negativ polarisierten Sauerstoff des Wasserstoffperoxids an, so dass durch die positive Ladung des Sauerstoffs ein Ion entsteht. Diese Reaktion läuft nicht vollständig ab und endet daher im Gleichgewicht. Im geschwindigkeitsbestimmenden Schritt greift ein Iodion an den positiv geladenen Sauerstoff an und überträgt ein Elektron, so dass Radikale entstehen.

Eine ähnliche Reaktion läuft im Schilddrüsengewebe als Fließgleichgewicht ab. Iodidionen werden mit der Nahrung zugeführt, von den Gewebezellen der Schilddrüse aufgenommen und gespeichert.

In den Gewebezellen wird durch Fettsäureabbau bereitgestelltes Wasserstoffperoxid entsorgt, indem Iodradikale und Wasser entstehen. Die reaktionsfähigen Iodradikale wiederum iodieren Restgruppen des für die Schilddrüse spezifischen Proteins, des Thyreoglobulins. Nach Bedarf werden die Thyreoglobuline um- und abgebaut und die dabei entstehenden Schilddrüsenhormone Thyroxin und Triiodthyronin ausgeschieden (Löffler et al. 2000 S. 466-469).

### 3.4.2 Kontextaspekte, fachliche Bausteine und Vernetzungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die Aspekte des Kontextes ‚Mangel und Übermaß – fehlgeleitete Ernährung‘, die entsprechenden fachlichen Bausteine und die Vernetzungen zusammengestellt.

**Tabelle 4: Kontextaspekte, fachliche Bausteine und entsprechende Vernetzungen**

Kontextaspekte	Fachinhalte	Vorausgesetzte Fachinhalte	Vernetzungen mit anderen Kontexten oder Kontextaspekten
Fette – Leidensdruck und Lebensgaranten	Klassifizierung von Lipiden. Räumliche Anordnungen von Lipiden in wässriger Lösung.	Carbonsäuren, Ester, Dipol, Wasserstoffbrücken	Fruchtig natürlich – natürlich fruchtig (Krilla & Ralle 2001) Essig, der saure Bruder des Weines (Krilla & Ralle 2001)
	Die Iodzahl, charakteristische Kennzahl ungesättigter Fettsäure.	Redoxreaktionen, Oxidationszahlen	Das Auto heute und morgen (Huntemann & Parchmann 2000)
	Die Verseifungszahl, eine zweite Kennzahl von Fetten.	Säure – Base - Reaktionen	Atmen unter Extrembedingungen (Hoffmann & Ralle 2000)
	Entropie, ein Maß für die Gleichverteilung von Teilchen.		
Fettfallen	Verbrennungsenthalpie und Brennwert eines Fettes.	Enthalpie, Energieumwandlungen, Energieerhaltungssatz	Das Auto heute und morgen (Huntemann & Parchmann 2000)
Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht	Enzym – Substrat- Komplex und Auswirkungen eines Hemmstoffes.	Enzymkatalysierte Reaktionen	Atmen unter Extrembedingungen (Hoffmann & Ralle 2000)
Abgemagert und angeschwollen	Quantitative Bestimmung von Proteinen mit Hilfe von photometrischen Messungen.	Proteine	Atmen unter Extrembedingungen (Hoffmann & Ralle 2000)
Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe	Die Methode der Anfangsgeschwindigkeit, ein vielfach genutztes Messprinzip in der Enzymatik. Der gekoppelt optische Test zur Bestimmung der Harnstoffkonzentration im Serum. Das Coenzym NAD <sup>+</sup> /NADH und seine Aufgabe in enzymkatalysierten Reaktionen.	Enzymkatalysierte Reaktionen	Atmen unter Extrembedingungen (Hoffmann & Ralle 2000) Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht
Antioxidantien	Der gekoppelt optische Test zur Bestimmung der Katalaseaktivität in Abhängigkeit von der Wasserstoffperoxidkonzentration. Das Geschwindigkeitsgesetz der enzymatisch katalysierten Wasserstoffperoxidzerersetzung. Die Katalase, ein Enzym, das der Michaelis – Menten – Kinetik folgt. Die säurekatalysierte Reaktion von Iodidionen mit Wasserstoffperoxid. Eigenschaften und Reaktionen von Radikalen.		Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe

### 3.4.3 Der Kontext ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘

Die Unterrichtsorganisation des Kontextes ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ erfolgt in den methodischen Schritten so wie sie von Ralle und Parchmann (2001 S. 6-7) vorgeschlagen werden. Begonnen wird mit der *Begegnungsphase*. In der *Begegnungsphase* werden die Kontextaspekte vorgestellt. Die Auswahl wird bestimmt von Sichtweisen, Meinungen und Bildern, die den Kontext nahe bringen. Der Unterrichtende gibt eine kurze Einführung in den Kontext und wählt dazu passende Abbildungen aus, die zur Visualisierung dienen (vgl. Anhang Abbildungen S. 5).

#### **Phänomene**

*In jedem Jahr treten Millionen Menschen an zum Kampf gegen die Pfunde. Schlanksein steht für jung, gesund, zäh und erfolgreich. Der geringe Erfolg kurzfristiger Diätprogramme ändert nichts an dem Glauben an die Wirksamkeit spezieller Kuren und neu entdeckter Wundermittel.*

*Warum hungern sich junge Mädchen und Frauen in den hochindustrialisierten Ländern das Fett von den Rippen und Hüften? Liegt es daran, dass in unserer Gesellschaft der Schlankheits- und Fitnesswahn soweit verbreitet ist? Dafür spricht, dass die Schaufensterpuppen heute zehn Zentimeter weniger Hüftumfang und fünf Zentimeter dünnere Oberschenkel haben als in den Zwanziger Jahren. Zur Zeit wiegen die Supermodels 23% weniger als der Durchschnitt der Frauen. Bestätigt wird das von zwei Hamburger Schülerinnen, die zur Zeit ihre Karriere als Topmodels starten und von Journalisten gefragt wurden (Stern Nr.46, 7.11.02, S. 304-308). Beide gelten als Schönheiten und wiegen nach eigenen Aussagen bei einer Größe von 1,76 m unter 50 kg. Die kollektive Verschlankung verheißt Glück, Erfolg und Reichtum.*

*Das war nicht immer so. Nicht nur in vorindustriellen Zeiten, sondern auch heute noch ist es in einigen Kulturen ein Vorteil, Fett zu besitzen. Es symbolisiert Fruchtbarkeit, Nahrung und Sicherheit. Das Märchenbild vom dicken Sultan, der strotzende Säugling, mit Babyspeck gepolstert gegen Krankheit und Kälte, die Venus von Willendorf, die Schönen, die Rembrandt oder Rubens malten, sie sind alle keine Hungerhaken.*

*In der Weltliteratur ist Fatima die Königin von allen dicken Frauen. Fatima wiegt 173 kg und stammt aus dem Roman ‚Wassermusik‘ von T.C. Boyle.*

*„Als Mungo, der Vertreter des englischen Königs Georg III., in das Heiligtum der Königin eintritt, sitzt Fatima auf einem Kissen, das so mächtig ist wie ein Doppelbett. Das Gesicht ist hinter einem Schleier aus doppelt gelegtem Haartuch verborgen, das Moslemfrauen in der Öffentlichkeit tragen. Ihre Füße und Hände sind klein und zierlich und schwimmen an den Enden der aufgedunsenen Extremitäten wie Enten auf einem Teich“ (Boyle 1996 S. 68).*

*Im 21. Jahrhundert sind das alles Bilder aus vergangenen Zeiten. Was heute zählt, ist eine schlanke Silhouette, so wie sie die Medienwirklichkeit täglich zeigt. Dicke Menschen haben es schwer. Fett lässt sich nicht so leicht verbergen. Das Problem liegt offen zutage. Der Wettstreit um die Kontrolle des Fetts im Körper beginnt schon im Kindesalter. ‚Fettkloß‘, ‚Fleischsack‘, ‚Plumpsack‘, nicht selten werden so dicke*

*Kinder in der Schule gehänselt und verhöhnt. Welche verletzte Kinderseele zieht sich dann nicht zurück in das Schneckenhaus aus Fett, ohne dort Schutz zu finden?*

*Nach Meinung der amerikanischen Forscher hat jeder sein individuelles Normalgewicht, das je nach Veranlagung mit mehr oder weniger Fettpolster einher geht. Will man abnehmen, so reicht es nicht aus, den Fettanteil der Nahrung zu reduzieren. Nehmen Versuchspersonen 10% ihres Körpergewichtes zu, antwortet der Körper umgehend, indem er den täglichen Energieverbrauch um durchschnittlich 25% steigert. Specken hingegen Versuchspersonen zehn Prozent ab, sinkt der durchschnittliche Tagesenergieverbrauch um 18 %, so dass die neu aufgenommene Nahrung viel wirkungsvoller in neues Speicherfett umgewandelt werden kann.*

*In der Regel bestätigt sich die alte Wahrheit: Das einzige, was wirklich zählt, ist die Bilanz von Energieaufnahme und Energieverbrauch. Sie ins Lot zu bringen ist eine Aufgabe, die keine noch so fettarme Diät schafft. Diät leitet sich vom griechischen Ausdruck ‚Diaita‘ ab, und das bedeutete schon in der Gesundheitslehre des Altertums nichts anderes als (gesunde) Lebensweise. Dazu gehören viel Bewegung und eine ausgewogene Ernährung.*

*Eine Umfrage an Gymnasien, die 1999 vom Therapiezentrum für Essstörungen am Max Planck Institut für Psychiatrie in München und dem bayrischen Gesundheitsministerium durchgeführt wurde, zeigt, dass ungefähr jedes zweite Mädchen und jeder dritte Junge im Alter von elf Jahren mit seiner Figur unzufrieden ist. Die befragten Kinder wollten dünner sein und etwa die Hälfte hat schon einmal versucht abzunehmen (Leydendecker 2001 S. 48). Im Kampf um die Pfunde werden die unterschiedlichsten Diäten ausprobiert mit wechselndem Erfolg.*

Zu dieser Einführung stehen neun Abbildungen zur Verfügung, die als Power - point - Präsentation oder als Folien genutzt werden können. Die Abbildungen lassen sich in drei Gruppen ordnen.

### 1. Schönheitsideale von gestern und heute

- Dick und dünn

(vgl. Anhang Abbildungen S. 3 Abb. 6: Luca – Schülerin und Model; Abb. 7: Ich und mein Selbstmodell; Abb. 8: Schönheitsideal von gestern)

- Verzerrte Wahrnehmungen

(vgl. Anhang Abbildungen S. 3 Abb. 4: Traumgewicht – Albtraumgewicht; Abb. 5: Tiefpunkt Traumgewicht; Abb. 9: Magersucht)

### 2. Mangel und Übermaß

(vgl. Anhang Abbildungen S. 6 Abb. 22: Die fette Verführung und S. 4 Abb. 14: Hungerbäuche)

### 3. Fett, die verkannte Masse

(vgl. Anhang Abbildungen S. 6 Abb. 21: Olivenbaum; Abb. 23: Hoch – Risiko – Fett; Abb. 24: Körperfett – Fluch und Segen)

Nachdem im ersten Schritt eine Einführung in den Kontext gegeben worden ist, werden im zweiten Schritt Fragen gesammelt, die als Kontextaspekte bearbeitet werden sollen. Um möglichst alle

Schüler und Schülerinnen anzusprechen, werden Moderationskarten verteilt, auf die individuell die Fragen und Wünsche an den Kontext formuliert werden können. Die Gruppen bilden Sinneinheiten für die Karten. Der Prozess ist abgeschlossen, wenn alle Karten zugeordnet worden sind. Nach abschließender Überprüfung der einzelnen Sinneinheiten werden Überbegriffe gesucht und auf einen gemeinsamen Nenner gebracht.

Folgende Fragen können die Erarbeitung der Kontextaspekte einleiten:

- Ist Fett gleich Fett? Worin bestehen Gemeinsamkeiten und Unterschiede und wie lassen sie sich experimentell nachweisen?
- Was ist mit „gutem“ oder „bösem“ Cholesterin gemeint?
- Was sind Omega - 3 - Fettsäuren ?
- Sind Fette Kalorienbomben? Lässt sich das experimentell nachweisen?
- Ist der Verzicht auf Fettfallen die einzige Möglichkeit Gewicht zu reduzieren?
- Wie wirken gewichtsreduzierende Medikamente und wie lässt sich die Wirkung experimentell nachweisen?
- Wann spricht man von Über - oder Untergewicht? Wie ist das Idealmaß festgelegt?
- Wie lässt sich ein Eiweißmangel feststellen?
- Was sind die Folgen beim Untergewicht? Lassen sich die Folgen experimentell simulieren?
- Wie entstehen Hungerbäuche von Kindern?
- Was sind die Folgen eines gezielten Muskelaufbaus? Lassen sie sich experimentell nachweisen?
- Was sind Antioxidanzien?
- Was sind freie Radikale und was richten sie an?

Sechs Lernstationen liefern für die gestellten Fragen Antworten. Untersucht werden:

- Gemeinsame und unterschiedliche Eigenschaften von Fetten
- Der Brennwert eines Fettes
- Die kompetitive Hemmung der Lipase
- Eiweißmangel und Ödeme, Ursache und Folge im Experiment
- Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe, ein Fließgleichgewicht im Körper
- Radikalfänger im Körper und ihre Effizienz

Jede Lernstation erhält einen Namen, der den Kontextaspekt verdeutlicht:

1. Fett – Leidensdruck und Lebensgarant
2. Die Fettfallen
3. Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht – Hoffnung aus der Pharmaindustrie
4. Abgemagert und angeschwollen: Eiweißmangel verursacht Ödeme
5. Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe – ein nachweisbarer Zusammenhang
6. Antioxidanzien – hochwertige Nahrungsergänzungen oder Ernährungsirrtümer?

### 3.4.4 Phänomene, Sachzusammenhänge und experimentelle Erschließung

#### Fett – Leidensdruck und Lebensgarant: Kontextaspekt 1

##### *Unser tägliches Fett und sein Nutzen*

Fette nehmen eine Vielzahl von Aufgaben im Körper wahr. Sie stellen einen idealen Energiespeicher dar. Sie sind am Aufbau von Biomembranen beteiligt und stellen das Rohmaterial für Hormone und andere Botenstoffe. Fettmoleküle sind ebenso Transporteure. Nur in ihrer Anwesenheit kann die Darmschleimhaut fettlösliche Vitamine aufnehmen. Fettmoleküle besitzen in reinem Zustand keinen eigenen Geruch oder Geschmack. Sie sind aber als Geruchs- und Geschmacksträger in Lebensmitteln verborgen. Aromastoffe entfalten erst in Gegenwart von Fetten ihre volle Wirksamkeit.

So vielfältig die Funktionen der Fette sind, so unterschiedlich sind auch die Moleküle, die unter dem Sammelbegriff Fette zusammengefasst sind. Fette gehören zur Naturstoffklasse der Lipide, die in allen Lebewesen vorkommen. Man unterscheidet zwischen verseifbaren und unverseifbaren Lipiden (Lehninger et al. 1998 S. 278 - 279, Rehner et al. 1999 S. 199, Löffler et al. 2000 S.147). Zu den verseifbaren Fetten gehören die Triacylglycerine. Nicht verseifbare Lipide sind entweder Fettsäuren und deren Abkömmlinge sowie Moleküle, die mit dem Isoprenmolekül (2-Methyl-1,3-Butadien) verwandt sind. Cholesterin leitet sich vom Isopren ab. Cholesterin ist im menschlichen und tierischen Organismus Ausgangspunkt für die Synthese der Gallensäure, der D – Vitamine und der Sexualhormone. Carotinoide, die im allgemeinen in Form von Provitaminen, den sogenannten Carotinen, vorliegen und die vielen pflanzlichen Lebensmitteln eine intensive gelbe oder orange Farbe verleihen, sind ebenfalls Isoprenabkömmlinge.

##### *Lipide*

Für den Organismus sind Lipide von Bedeutung, bei denen Glycerin als alkoholischer Bestandteil verwendet wird. Sind alle drei Hydroxylgruppen des Glycerins verestert, so handelt es sich um Triacylglycerine. Diese Verbindungsklasse stellt als Depotfett den größten Energievorrat in menschlichen Zellen dar. Die Esterbindungen in Triacylglycerinen sind empfindlich gegenüber Säuren oder Basen. Beim Erhitzen der Depotfette mit Natronlauge bilden sich Glycerin und die  $\text{Na}^+$ - Salze und  $\text{K}^+$  - Salze der Fettsäuren, die als Seifen bezeichnet werden.

Phospholipide sind gemeinsam mit Proteinen am Aufbau von Membranen beteiligt. Sie sind ebenfalls Ester von Fettsäuren mit Glycerin, besitzen aber nur zwei Fettsäuren pro Molekül. Der dritte an Glycerin gebundene Bestandteil ist die wasserlösliche Phosphorsäure. Infolgedessen sind Phospholipide fähig, im wässrigen Medium geordnete Strukturen, die Micellen genannt werden, zu bilden. Micellen spielen beim Aufbau von Membranen eine große Rolle.

Gesättigte Fettsäuren sind vor allem in Fleisch, Milch, Butter und Käse enthalten. Gesättigt sind Fettsäuren dann, wenn keine Doppelbindungen im unpolaren Teil der Fettsäure auftreten. Von den gesättigten Fettsäuren ist die Häufigkeit der unverzweigten Verbindungen mit einem geradzahligem Kohlenstoffgerüst am höchsten.

Ungesättigte Fettsäuren sind in Oliven- Raps- Rüben- und Erdnussöl enthalten. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass an zwei benachbarten Kohlenstoffatomen eine C=C – Doppelbindung auftritt. Liegen mehrere C=C – Doppelbindungen vor, so handelt es sich um mehrfach ungesättigte Fettsäuren. Die Doppelbindungen sind in der Regel durch CH<sub>2</sub> – Gruppen voneinander getrennt. Man unterscheidet zwischen Omega – 3 -, Omega – 6 -, und Omega – 9 – Fettsäuren. Die Zahl drei, sechs oder neun gibt dabei an, am wievielten Kohlenstoffatom die erste Doppelbindung auftritt.

Zu der Familie der Omega – 3 – Fettsäuren gehört die mehrfach ungesättigte  $\alpha$  - Linolensäure. Häufigste Vertreterin der Omega – 6 - Fettsäuren ist die Linolsäure. Die einfach ungesättigte Ölsäure gehört zu den Omega – 9 – Fettsäuren. Die mehrfach ungesättigten Fettsäuren Linolsäure und  $\alpha$  - Linolensäure sind für den Menschen essenzielle Fettsäuren. Sie werden vom Körper nicht selbst synthetisiert, müssen von der Nahrung aufgenommen werden und dienen als Ausgangsstoff für weitere ungesättigte Fettsäuren. Der Mensch ist in der Lage aus den aus vorwiegend pflanzlicher Nahrung aufgenommenen essenziellen Fettsäuren mehrfach ungesättigte Fettsäuren nach Bedarf herzustellen.

**Tabelle 5: Hauptfettsäuren (Belitz 2001 S. 152, 155)**

Kurzschreibweise	Summenformel	Trivialname	Systematischer Name	Anteil (%) <sup>b</sup>
14:0	C <sub>13</sub> H <sub>27</sub> COOH	Myristinsäure	Tetradecansäure	2
16:0	C <sub>15</sub> H <sub>31</sub> COOH	Palmitinsäure	Hexadecansäure	11
18:0	C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH	Stearinsäure	Octadecansäure	4
18:1(9) <sup>a</sup>	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> COOH	Ölsäure	Cis- $\omega^9$ -Octadecensäure	34
18:2 (9, 12) <sup>a</sup>	C <sub>17</sub> H <sub>31</sub> COOH	Linolsäure	Cis- $\omega^{9,12}$ Octadecadiensäure	34
18,3 (9, 12, 15) <sup>a</sup>	C <sub>17</sub> H <sub>29</sub> COOH	Linolensäure	Cis- $\omega^{9,12,15}$ Octadecatriensäure	5

a: Die in Klammern gesetzten Zahlen geben die Positionen der Doppelbindungen an. Die Zählung erfolgt ausgehend von der Carboxylgruppe.

b: geschätzter Anteil an der Weltproduktion pflanzlicher Fette

$\omega^{x,y,z}$  gibt die Positionen der Doppelbindungen an

Bei ungesättigten Fettsäuren können die Wasserstoffatome an den benachbarten Kohlenstoffatomen einer Doppelbindung auf einer Seite oder an sich zwei gegenüberliegenden

Seiten liegen. Liegen sie auf der gleichen Seite, so handelt es sich um eine Fettsäure in der cis – Konfiguration (cis: lat. = diesseits), liegen sie sich gegenüber, spricht man von einer Fettsäure der trans – Konfiguration (trans: lat. = über, hinüber) (Belitz et al. 2001 S. 158).

Fettsäuren der trans – Konfiguration entstehen bei der Härtung pflanzlicher Öle. Sie sind in Frittierfett, gehärteter Margarine, Keksen, Chips enthalten und können den Cholesterinspiegel erhöhen. In natürlichen tierischen und pflanzlichen Fetten liegen die ungesättigten Fettsäuren mit Ausnahme von Milchfetten fast nur in der cis – Konfiguration vor. Fette mit hohem Anteil an cis – Konfiguration sind weicher und flüssiger als Fette mit Fettsäuren der trans - Konfiguration.

### ***Cholesterin, ein bedeutsames Körperfett, das sich nicht verseifen lässt.***

#### ***a) Aufgaben des Cholesterins***

Eine Hauptaufgabe des Cholesterins ist es, die Membranen der Körperzellen zu stabilisieren. Ohne den Zusatz von Cholesterin wären sie so beweglich wie ein Ölfilm auf dem Wasser. Wenn es gelänge, alles Cholesterin aus dem Körper zu entfernen, bliebe vermutlich neben dem Skelett nicht mehr als ein wässriger Haufen vom Menschen übrig. Cholesterin sorgt in den Membranen für das erforderliche Maß an Festigkeit und Elastizität. Es schützt die roten Blutplättchen vor dem Zerfließen, es wird für den Neuaufbau von Immunzellen gebraucht und es hält die Isolierschicht der Nervenzellen zusammen, ohne die keine Nervenerregung möglich wäre.

Manche Organe enthalten beträchtliche Mengen an Cholesterin. Beim gesunden Herzen macht der Cholesteringehalt 10% aus, beim Gehirn sind es 10 – 20%. Der Säugling ist noch nicht in der Lage Cholesterin selbst herzustellen. Der lebenswichtige Stoff wird ihm durch die Muttermilch zugeführt. Die Nebennieren eines Erwachsenen bestehen sogar zur Hälfte aus Cholesterin. Sie sind hormonbildende Drüsen, in denen aus Cholesterin viele wichtige Hormone und andere lebensnotwendige Funktionsträger hergestellt werden. Dazu gehören Sexualhormone, Stresshormone und Vitamin D für die Haut und die Knochen.

Cholesterin ist für den menschlichen Körper ein wichtiger, lebenserhaltender Wirkstoff. Um so unverständlicher ist die häufig verbreitete Meinung, Cholesterin sei schädlich. Der menschliche Körper stellt Cholesterin selbst in ausreichender Menge her. Je nach Bedarf beträgt die Tagesproduktion zwischen 1g und 1,5g. Bei zu üppiger Versorgung verhängt der Körper sich selbst einen Produktionsstopp. Bei massiver Zufuhr von außen wird die Eigenproduktion reduziert. Bleibt die Zufuhr unter einem Limit, dann wird die Cholesterinsynthese angeregt.

Cholesterin besteht fast nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Daher ist es in Wasser unlöslich und muss dennoch im Blut transportiert werden. Es lagert sich mit Lipoproteinen zusammen. Das sind Moleküle, die einen Fett- und einen Proteinanteil haben, sich zu Kügelchen bilden, wobei die wasserlöslichen Teile nach außen und die wasserabstoßenden Teile nach innen gerichtet sind. Im

inneren Teil sind die Cholesterinmoleküle gelagert und können von ihren Transportmolekülen zum Platz ihrer Verwendung transportiert werden.

### ***b) Das ‚gute‘ und das ‚schlechte‘ Cholesterin***

Es gibt zwei bekannte Arten der Cholesterin transportierenden Lipoproteine: LDL (low density lipoproteins) und HDL (high density lipoproteins). Aufgrund ihrer verschiedenen Protein- und Lipidzusammensetzungen besitzen die Lipoproteine unterschiedliche Dichten. In beiden Transportformen ist das Cholesterin exakt das gleiche, die Unterscheidung in HDL und LDL erfolgt nach den Ergebnissen der Dichteuntersuchungen. Wenn man in populärwissenschaftlicher Literatur von ‚gutem‘ und ‚schlechtem‘ Cholesterin spricht (vgl. Gasser 1999 S. 12, Pollmer & Warmuth 200 S. 71), dann meint man mit dem ‚guten‘ das HDL – Cholesterin und mit dem ‚schlechten‘ das LDL – Cholesterin. Gefährlich sind die LDL – Moleküle. Sie haben die unangenehme Eigenschaft, Ablagerungen in den Gefäßen zu fördern. Die HDL – Spezies dagegen werden für nützlich gehalten. Sie scheinen an der Auflösung der Gefäßablagerungen beteiligt zu sein, indem sie Cholesterin zurück zur Leber transportieren. Sie nehmen damit die Funktion einer „Cholesterin-Müllabfuhr“ ein, denn sie binden Cholesterin aus dem Blut, transportieren es, so dass es von der Leber aufgenommen werden kann und aus dem Blut verschwindet. Verantwortlich für das erhöhte Herzinfarkttrisiko ist der hohe LDL - Cholesterinspiegel im Blut. Eine hoher HDL - Spiegel hingegen senkt den Cholesteringehalt des Blutes und trägt dazu bei, das Risiko einer Herzerkrankung zu minimieren.

### ***c) Zwei Cholesterinkreisläufe***

Zu unterscheiden sind ein exogener und einen endogener Cholesterinkreislauf (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb.17: exogener und endogener Cholesterinkreislauf, Abb. 18: Micellen und Chylomikrone). Der exogene Kreislauf beginnt im Darm, wo die Triacylglycerine aus der Fettverdauung und das in der Nahrung vorhandene Cholesterin aufgenommen werden. Sie liegen in einem speziellen Lipoproteinverband, den Chylomikronen, vor, die den Transport im Blut sichern.

Mit der speziellen Verpackung ist die Stabilität der Fettpakete auf ihrer Route über die Lymphe und das Blut garantiert. Die Chylomikrone besitzen eine Oberflächenmembran, die von Phospholipiden gebildet wird, die mit ihrer polaren Gruppe nach außen gewandt und mit ihren unpolaren Gruppen nach innen gerichtet sind. Die Proteine sind in die Oberflächenmembran eingelagert, so dass sie Kommunikationsfunktionen erfüllen können, die den erneuten Abbau der nun verpackten Triacylglycerine einleiten. Im Inneren der Chylomikronen befinden sich bevorzugt die Depotfette und die Vitamine A, D, E und K, weiter außen, zum Teil in die Oberfläche eingelagert, ist das Cholesterin gebunden.

Die wasserunlöslichen Triacylglycerine werden insbesondere in den feinen Kapillaren des Blutes, die das Fettgewebe und die Skelettmuskulatur versorgen, durch die Lipase zu Fettsäuren und Glycerin abgebaut. Da die Fettsäuren die Chylomikronen verlassen und sich in die Gewebezellen einschleusen, werden die Chylomikrone kleiner und flacher und enthalten vorwiegend das aus der Nahrung aufgenommene Cholesterin. Der Bestimmungsort für die Chylomikrone ist die Leber. Dort wird die Cholesterinfracht abgegeben und je nach Bedarf als Membranmaterial oder Gallensäure umgebaut. Die Gallensäure steht erneut den Dünndarmzellen zur Verfügung. Damit ist der exogene Kreislauf geschlossen.

Der endogene Kreislauf beginnt in der Leber. Die Leber synthetisiert Transportmoleküle mit sehr geringer Dichte. Es sind VLDL - Komplexe, die ins Blut abgegeben werden und Triacylglycerine und Cholesterin enthalten. VLDL – Komplexe haben ein ähnliches Schicksal wie die Chylomikrone. Die Triacylglyceridfracht wird von den Lipasen erkannt und die Fettsäuren verlassen den Transportverband. Die Dichte des VLDL – Transportmoleküls ändert sich nach Verlust der Fettsäuren und es entsteht eine neue stabile Transportform, die vermehrt Cholesterin enthält, der LDL - Komplex. LDL – Cholesterin wird von der Leber im Blut zu den Gewebezellen transportiert und von den Gewebezellen durch Rezeptoren an der Zelloberfläche aufgenommen. Cholesterin, was in den Gewebezellen nicht verarbeitet wird, wird von HDL - Komplexen, die im Blut kreisen, aufgenommen, zur Leber zurücktransportiert und dort endgültig abgebaut (vgl. Anhang Abbildungen S. 5 Abb.17: exogener und endogener Cholesterinkreislauf, Abb. 18: Micellen und Chylomikrone, Abb.20: LDL- und HDL Lipoproteine).

#### **d) Der LDL – Rezeptor**

Jede Zelle besitzt LDL – Rezeptoren, die in die Zellmembran integriert sind. Von ihnen werden LDL – Transportmoleküle erkannt, gebunden und in die Zelle eingeschleust. Die Anzahl der Rezeptoren wird reguliert von dem LDL – Spiegel des Blutes (vgl. Anhang Abbildungen S. 5 Abb. 19: LDL – Rezeptor). Ist die Zelle ausreichend mit Cholesterin versorgt, reduziert sich die Anzahl der Rezeptoren. Fehlt Cholesterin, wächst die Anzahl.

Fällt erblich bedingt der LDL –Rezeptor aus, entwickeln die Betroffenen schon in der Jugend schwere Arteriosklerosen. Die Ursache ist, dass bei den Erkrankten die Aufnahme von Cholesterin in die Zellen nicht stattfindet. Damit verbleibt das aus der Nahrung aufgenommene Cholesterin im Blut und wird nicht entfernt. Zusätzlich geht die Synthese von Cholesterin produzierenden Zellen weiter, da kein Cholesterin in das Cytosol der Zellen gelangt und damit eine Steuerung der Produktion ausfällt. Der Blutcholesterinspiegel steigt weiter und überschreitet damit deutlich den empfohlenen Richtwert von maximal 5,2 mmol/1000 mL Blut.

### e) Cholesterinsenkende Wirkstoffe

Zwei natürliche, aus Pilzen erhaltene Produkte, Lovastatin und Compactin, hemmen die Cholesterinsynthese in der Leber und sind die Wirkstoffe in cholesterinsenkenden Medikamenten. Sinkt die Cholesterinsynthese in den Zellen, werden mehr LDL – Rezeptoren ausgebildet. Damit wird mehr LDL aus dem Blut aufgenommen. Als Folge nimmt die Konzentration von LDL – Lipoproteinen ab und der Gesamtcholesterinspiegel sinkt.

Wird allerdings der Wirkstoff, der die Cholesterinsynthese hemmt, in Kombination verabreicht mit einem zweiten Wirkstoff, der den Anteil von VLDL erniedrigt, also den Anteil der Lipoproteine, der bevorzugt Triacylglycerine transportiert, dann wird der Cholesterinspiegel zu niedrig und Rhabdomyolysen können sich einstellen (Mutschler 1997 S. 438). Bei einer Rhabdomyolyse wird die quergestreifte Muskulatur aufgelöst, da sich Membranen nicht mehr aufbauen können. Die Kombination zweier Wirkstoffe in den Medikamenten führt anscheinend zu tödlichen Folgen.

Allein in Deutschland waren eine halbe Millionen Menschen von der Meldung schockiert, dass das Medikament, das sie einnehmen, um den individuellen Cholesterinspiegel zu senken, im Verdacht steht, einen Muskelzerfall mit tödlicher Folge auszulösen. Das Medikament, das von der Firma Beyer unter dem Namen Lipobay® 1997 eingeführt worden ist und im Sommer 2001 vom Markt genommen wurde, wird verabreicht, um die Risiken für einen Herzinfarkt oder einen Schlaganfall zu senken. Manchmal scheint das Mittel aber Leben zu beenden, anstatt es zu retten. Lipobay® steht unter Verdacht, weltweit 52 Todesfälle ausgelöst zu haben. Da mag auch der Hinweis nicht beruhigen, dass die Todesfälle hauptsächlich aufgetreten sind, weil die Patienten gleichzeitig ein zweites Medikament eingenommen haben, das zusätzlich den Triacylglyceridspiegel senkt (Informationen zu Lipobay®. [www.zeiss-apotheke.de/Lipobay.htm](http://www.zeiss-apotheke.de/Lipobay.htm)).

**Tabelle 6: Fettsäuren und ihre Wirkung auf die Konzentrationen von LDL – Cholesterin, HDL – Cholesterin sowie VLDL - Triglyceriden im Plasma (Wolfram 2001 S. 393)**

	LDL - Cholesterin	HDL Cholesterin	VLDL - Triglyceride <sup>7</sup>
Gesättigte Fettsäuren	↑	↑	↓
Omega –9- Ölsäure	↓	↑	↓
Omega – 6- Linolsäure	↓	↑	↓
Omega – 3- Linolensäure	↓	↑/↓	↓
↑: Anstieg, ↓: Abfall			

<sup>7</sup> VLDL -Triglyceride werden in der Leber produziert. Es handelt sich dabei um Transportmoleküle, die Triglyceride und Cholesterin enthalten.

## ***Experimentelle Umsetzung***

### ***Versuch 1: Fette im Vergleich (Kicinski 1999 S. 77-79, Bauer & Melle 1999 S. 22)***

#### Messprinzip: Dünnschichtchromatographische Auftrennung

Die Dünnschichtchromatographie ist ein Verfahren zur Trennung von gelösten Stoffgemischen. Die einzelnen Bestandteile des Gemisches haften unterschiedlich fest am Trägermaterial, werden aber andererseits verschieden schnell mit dem Laufmittel transportiert. Die Stoffe legen unterschiedliche Strecken zurück, anhand derer sie identifiziert werden. Die Sichtbarmachung der polaren Lipide erfolgt durch Molybdätophosphorsäure, die als Sprühreagenz verwendet wird und den Substanzfleck blau färbt, wenn die Platte vorher in eine gesättigte Eisen – III – chloridlösung getaucht worden ist.

#### Geräte und Chemikalien:

Glastrog, Glaskapillaren, DC – Folien (Polygram SIL G F 254), Fön, Pinzette, Stoppuhr, Messpipetten, Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Gummistopfen, Dichlormethan (R 40; S 2-23-24/25-36/37)<sup>8</sup>, Toluol (R 11-20; S (2)–16-25-29-33), Petroleumbenzin, 40° - 60°C, Cholesterin – Vergleichslösung, Molybdätophosphorsäure, Sprühlösung für DC, Butter, Margarine, Speiseöl, Lineal, Bleistift, Trockenschrank

#### Vorbereitete Lösungen:

Das Laufmittel wurde aus 15 mL Dichlormethan und 6 mL Toluol von der Lehrerin unter dem Abzug hergestellt.

10 mL einer Molybdätophosphorsäure mit der Konzentration  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  dienen als Nachweismittel.

#### Messungen

- Lösen Sie 10 mg Palmitinsäure in einem Reagenzglas in 5 mL Petroleumbenzin.
- Wiegen Sie 1g Butter, 1g Margarine bzw. 1 mL Speiseöl in ein Reagenzglas ein, versetzen Sie jedes Reagenzglas mit 5 mL Petroleumbenzin und schütteln Sie.
- Die gekaufte Cholesterinlösung kann direkt zur Chromatographie verwendet werden.
- Geben Sie die Probelösungen und die Vergleichslösung je auf ein Uhrglas. Tragen Sie dann mit Glaskapillaren in definierten Abständen die Proben auf zwei Kieselgel – Platten auf.
- Wiederholen Sie den Vorgang mehrfach. Fassen Sie dabei die Platte nicht an, da Fettflecke auf der Kieselschicht die Auftrennung stören.
- Trocknen Sie die Startflecken mit einem Fön. Geben Sie die Platten in eine Trennkammer mit ca. 10 mL der mobilen Phase. Achten Sie darauf, dass die DC – Platte nicht den Rand des Gefäßes berührt und die Startflecken nicht in das Laufmittel eintauchen. Verschließen Sie die Trennkammer mit einem Deckel.
- Wenn das Laufmittel fast die Oberkante erreicht hat, nehmen Sie dann die Platten aus der Kammer.
- Trocknen Sie die Platte unter dem Abzug.
- Tauchen Sie die DC – Platten in eine gesättigte Eisen – III – chloridlösung.

---

<sup>8</sup> Nach den für das Land Niedersachsen gültigen Sicherheitsbestimmungen GUV 1916A und GUV 19.16

- Besprühen Sie zur optimalen Farbbildung die Platte mit Molybdätophosphorsäure  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  unter dem Abzug.
- Legen Sie die Platte erneut bei  $120^\circ \text{ C}$  in den Trockenschrank.

#### Beobachtungen und Auswertungen:

Es erscheinen dunkelblaue Flecken auf gelbgrünem Grund. Butter, Speiseöl und Margarine enthalten als Hauptbestandteil Triacylglycerine. Butter und Margarine enthalten Cholesterin in geringen Mengen.

#### Rf – Werte:

Cholesterinester:	Rf = ca 0,95
Triacylglycerine:	Rf = ca 0,60
Freie Fettsäuren:	Rf = ca 0,17
Cholesterin:	Rf = ca 0,16
Phospholipide	Rf = ca 0-0,1

#### ***Versuch 2: Ungesättigte Fettsäuren und ihr Anteil im Fett (Baumann 1999 S. 67)***

#### Messprinzip: Iodzahlbestimmung:

Die Iodzahl ist ein Maß für die Anzahl der Doppelbindungen in einem Fett. Die Bezeichnung Iodzahl ist historisch bedingt. Iod reagiert kaum mit den Doppelbindungen im Fett. Deshalb wird das reaktionsfähigere Brom gewählt. Der Überschuss an Brom reagiert mit einer äquivalenten Stoffmenge an Iodidionen, die dann zu Iod oxidiert werden. Das gebildete Iod wird mit Natriumthiosulfatlösung gegen Stärkelösung bestimmt. Die Stärke dient als Farbindikator.

Aus dem Verbrauch an Natriumthiosulfat kann auf die verbliebende Stoffmenge Brom geschlossen werden. Für ihre Bestimmung wird eine methanolische Brom - Lösung im Überschuss zugegeben. Das nicht an Doppelbindungen addierte Brom wird durch iodometrische Titration mit Natriumthiosulfat bestimmt.

Um die Stoffmenge von Brom zu bestimmen, die vor der Addition von Brom vorlag, muss in einer Blindprobe das bis zur Entfärbung zugegebene Volumen an Thiosulfat bestimmt werden. Die Blindprobe enthält die gleichen Reagenzien wie die Probelösung mit Ausnahme des Öles. Die Differenz zwischen dem Verbrauch in der Blindprobe und dem Verbrauch in der Probelösung ist ein Maß für die Doppelbindungen im Fett. Die Iodzahl bezeichnet die Menge an Halogen in g, die von 100 g Öl gebunden wird.

#### Geräte und Chemikalien:

Bürette, Brom (R 26-35, S (1/2)-7/9-26-45), Methanol (R 11-23/25; S (1/2)-7-16-24-45), Kaliumiodid, Stärke, Natriumthiosulfat, Olivenöl, Sonnenblumenöl, Soja- Erdnussöl

### Zur Verfügung stehen:

Methanolische Brom - Lösung (1 mL Brom + 99 mL Methanol), 10%ige Kaliumiodidlösung (10g in 100 gWasser), 1%ige Stärkelösung (1g Stärke in 100 mL Aqua dest), Natriumthiosulfatlösung  $c = 0,1 \text{ mol/L}$

### Messungen

- Wiegen Sie in einen 300 mL - Erlenmeyerkolben 0,9 g Olivenöl ein und notieren Sie das genaue Gewicht.
- Lösen Sie das Öl in 20 mL Methanol unter dem Abzug.
- Pipettieren Sie dazu 40 mL methanolische Bromlösung (1 mL Brom + 99 mL Methanol).
- Stellen Sie den Kolben 10 Minuten ins Dunkle oder umwickeln Sie den Kolben mit Aluminiumfolie.
- Nach 10 Minuten geben Sie nacheinander 50 mL Wasser, 20 mL Kaliumiodidlösung (10%ig) und einige Tropfen Stärkelösung hinzu.
- Titrieren Sie die Probelösung mit Natriumthiosulfatlösung  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  bis zur Entfärbung und notieren Sie den Verbrauch.
- Wiederholen Sie den Versuch unter gleichen Bedingungen, allerdings ohne eine Ölprobe und notieren Sie den Verbrauch.

### Auswertungen

1. Die iodometrische Titration wird bestimmt durch zwei Redoxreaktionen. Formulieren Sie den Kern der Redoxreaktionen und verdeutlichen Sie mit Hilfe der Oxidationszahlen, welche Atome oder Ionen oxidiert bzw. reduziert werden.
2. Erklären Sie den Mechanismus der Bromaddition an Doppelbindungen.
3. Begründen Sie, warum das Reaktionsgemisch nach Zugabe der methanolischen Brom - Lösung im Dunkeln stehen muss.
4. Berechnen Sie die Iodzahl.
5. Vergleichen Sie Ihren Wert mit dem Literaturwert und begründen Sie eventuelle Abweichungen.

$$IZ = (v_2 - v_1) \cdot c (\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) \cdot M_{\text{I}^-} \cdot 100/m_{\text{Fett}}$$

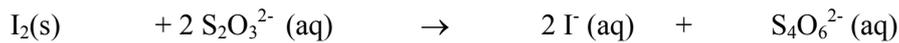
### Anmerkungen

Die Iodzahl bezeichnet die Menge an Iodidionen in g, die von 100g Öl gebunden wird.  $V_2$  ist das Volumen an Thiosulfat, das verbraucht wird, wenn das Fett fehlt.  $V_1$  ist das Volumen der Thiosulfatlösung, das verbraucht wird, wenn das Fett vorhanden ist.

### Beobachtungen und Ergebnisse

Nach Zugabe von methanolischer Bromlösung und Kaliumiodid ist die Lösung braun gefärbt. Ein Teil der zugesetzten Bromlösung addiert an die Doppelbindungen im Fett. Der Überschuss an Brom reagiert mit einer äquivalenten Menge Iodidionen. Die Iodidionen werden dabei zu elementarem Iod oxidiert. Mit Stärkelösung entsteht daraus eine tiefblaue Lösung. Die Stärke dient als Farbindikator, da sie mit Iod einen intensiv blau gefärbten Komplex bildet. Natriumthiosulfat entfärbt die blaue Lösung. Wenn die Lösung farblos geworden ist, hat Iod vollständig reagiert und der Endpunkt der Titration ist erreicht. Aus dem Verbrauch an Thiosulfatlösung kann daher auf die verbliebene Molzahl Brom geschlossen werden. Aus der Differenz der zugegebenen Bromstoffmenge (Blindwert), deren Molzahl ebenfalls durch Titration bestimmt wird, und der verbleibenden Brommenge wird der Gehalt an Doppelbindungen bestimmt.





Werden für die gesamte Stoffmenge an Brom 123 mL Thiosulfatlösung verbraucht und für die nicht mit dem Öl reagierende Stoffmenge Brom 61 mL, so ergibt sich für die Brommenge, die mit dem Öl reagiert hat, ein Volumen von 62 mL. Das sind 0,0062 mol Thiosulfat. Da 0,0062 mol Thiosulfat 0,0062 mol Iodionen entsprechen und Iodionen eine Molmasse von 126,91 g/mol besitzen, ergibt sich eine Masse der Iodionen von 0,7868 g. Bei einer Einwaage des Öl von 0,89g ergibt sich der Wert von 0,884. Die Iodzahl beträgt 88,4. Also werden 88,4 g Iodidionen von 100 g Öl gebunden.

**Tabelle 7: Literaturwerte für die mittleren Iodzahlen verschiedener Speisefette und ungesättigter Fettsäuren (Baumann 1999 S. 67):**

Kokosfett	9
Butter	30
Olivenöl	84
Sonnenblumenöl	132
Sojaöl	134
Erdnussöl	156
Ölsäure	90
Linolsäure	181
Linolensäure	273

### ***Bestimmung der Verseifungszahl von Fetten***

#### Messprinzip: Titrimetrische Bestimmung

Die Verseifungszahl ist das Maß für die in einem Fett enthaltenen freien und gebundenen Säuren. Die Fettprobe wird mit einem Überschuss ethanolischer Kaliumhydroxidlösung verseift, und die verbleibende Menge an Kaliumhydroxid wird titrimetrisch bestimmt.

#### Geräte und Chemikalien:

Salzsäure (c = 0,5 mol/L) (R 36/37/38 S (2)-28), Kaliumhydroxidplätzchen (R 35 S(1/2)–26-37/39-45), Phenolphthaleinlösung, Ethanol absolut (R 11 S (2)-7-16), Glycerin, Olivenöl, Kokosfett, Bürette, Becherglas, drei 250 mL – Rundkolben, Rückflusskühler mit passenden Schläuchen, Heizpflanz, Stativmaterial.

Zur Verfügung steht eine alkoholische Kaliumhydroxidlösung. Dazu werden 14 g Kaliumhydroxid in 10 mL destilliertem Wasser gelöst, mit Ethanol in einen 500 mL - Messkolben gegeben und bis zur Marke aufgefüllt.

#### Versuchsdurchführung und Messungen

- Nummerieren Sie die drei Rundkolben. In den Rundkolben 1 wiegen Sie ca 2g Olivenöl ein. Das genaue Gewicht wird notiert.

- Dazu werden 25 mL alkoholische Kaliumhydroxidlösung  $c = 0,5 \text{ mol/L}$  pipettiert und mit Siedesteinen versehen. Der Kolben wird so befestigt, dass er mit dem Kühler verbunden ist.
- Bringen Sie einen Heizpilz unter dem Kolben an und stellen Sie die Kühlung an. Die Mischung wird 30 Minuten unter Rückfluss erhitzt.
- Befestigen Sie eine Bürette an einem Stativ und füllen Sie die Bürette mit Salzsäure  $c = 0,5 \text{ mol/L}$ .
- Nach 30 Minuten entfernen Sie den Kolben aus dem Aufbau und versetzen die warme Lösung mit vier Tropfen Phenolphthalein.
- Geben Sie aus einer Bürette unter Umschwenken  $0,5 \text{ molare}$  Salzsäure zu, bis die Rotfärbung gerade verschwindet und notieren Sie den Verbrauch.
- Der Versuch wird mit  $2 \text{ g}$  Kokosfett wiederholt.
- Zur Bestimmung des Blindwertes wird unter gleichen Bedingungen in Kolben 3 ein Ansatz ohne Fettzugabe erhitzt und titriert.

### Beobachtungen und Ergebnisse

Das Fett löst sich beim Erwärmen in alkoholischer Kaliumhydroxidlösung. Es entsteht eine klare Lösung, die leicht schäumt. Nach Zugabe von Phenolphthalein färbt sie sich rot. Durch Titration mit Salzsäure wird die Lösung entfärbt.

Durch das Kochen in alkoholischer Kaliumhydroxidlösung werden die Triacylglycerine der Fette in Glycerin und Fettsäuren gespalten. Für jede Esterbindung wird eine Hydroxidion verbraucht. Die Fettsäuren bilden mit Kaliumionen Seifen, die man am Schäumen erkennt. Die im Fett vorhandenen, freien Fettsäuren werden durch die Zugabe der alkoholischen Kaliumhydroxidlösung neutralisiert.

Die alkoholische Kaliumhydroxidlösung wird im Überschuss dazugegeben und der nicht zur Verseifung benötigte Rest mit Salzsäure zurücktitriert. Die Differenz zwischen dem Verbrauch für den Blindwert und für die Probe ergibt unter Berücksichtigung der Molarität der Salzsäure die Stoffmenge an Kaliumhydroxid, die für die Verseifung verbraucht wird. Diese Stoffmenge entspricht der Molzahl der im Triacylglycerid enthaltenen Säure. Der Verbrauch in der Blindprobe ergibt sich aus dem Volumen der hinzugegebenen Kaliumhydroxidlösung abzüglich des Volumens, das für die Neutralisation der freien Fettsäuren benötigt wird. Damit ist die experimentell bestimmte Verseifungszahl niedriger als nach der Fettsäurezusammensetzung zu erwarten wäre. Für eine Qualitätsbeurteilung müssen neben der Verseifungszahl also auch immer die Säurezahl und der Gehalt an Unverseifbarem mitberücksichtigt werden.

Die Verseifungszahl entspricht der Masse Kaliumhydroxid in mg, die zur Verseifung von einem Gramm Fett erforderlich ist. Sie wird mit Hilfe folgender Gleichung berechnet:

$$VZ = \frac{(b-a) \cdot c \cdot 56,1 \cdot 1000}{E}$$

E            Fetteinwaage in g

c:            Konzentration der Salzsäurelösung in mol/L

- b:           Volumen an Salzsäure für Blindprobe in mL  
a:           Volumen an Salzsäure für Probe

Die Verseifungszahl ist abhängig von der Kettenlänge der Fettsäuren. Sie ist umso größer, je höher der Anteil von kurzkettigen Fettsäuren ist. Sind im Fett mehr kurzkettige Fettsäuren verestert, enthält ein Gramm Seife mehr Fettsäuren. Im Vergleich dazu ist die Verseifungszahl niedrig, wenn mehr langkettige Fettsäuren mit einem durchschnittlich höherem Molekulargewicht im Fett verestert sind. Ein Gramm Seife enthält dann weniger Fettsäuren.

**Tabelle 8: Verseifungszahlen verschiedener Fette (Baumann et al. 1999 S. 59, Belitz et al. S. 650)**

Fette	Verseifungszahl VZ
Olivenöl	184-196
Erdnussöl	187-196
Sonnenblumenöl	188-194
Schweinefett	192-103
Butterfett	218-262
Kokosfett	254-262

### ***Versuch 3: Qualitativer Nachweis von Cholesterin (Baumann 1999 S. 77-79)***

#### Geräte und Chemikalien

100 mL – Messzylinder, 100 mL – Becherglas, 6 Reagenzgläser, Reagenzglashalter, Glasstab, Cholesterin – Vergleichslösung, Eisen – III – chloridhexahydrat (R 22-28-41 S 26-39), Essigsäure 99-100% (R 10-34 S (1/2) 23-26-45), Petroleumbenzin 40°C - 60°C (R 11 S 9-16-29-33), Schwefelsäure 95-98% (R 35 S (1/2)-26-30-45), Butterfett, Schmalz, Sonnenblumenöl, Olivenöl.

#### Versuchsvorschrift

- Nummerieren Sie 6 Reagenzgläser von 1 - 6 durch.
- In jedes Reagenzglas geben Sie 2 mL Petroleumbenzin.
- In Reagenzglas 2 fügen Sie 0,5 mL Cholesterin, in Reagenzglas 3 eine Spatelspitze Butter, in Reagenzglas 4 eine Spatelspitze Schmalz, in Reagenzglas 5 ein mL Olivenöl, in Reagenzglas 6 ein mL Sonnenblumenöl. Schütteln Sie alle Proben.
- Lassen Sie in jedes Reagenzglas langsam an der Glaswand konzentrierte Schwefelsäure mit Hilfe einer Pasteurpipette entlang fließen. Notieren Sie die Farbveränderungen.
- Lassen Sie in gleicher Weise je drei Tropfen Eisen – III - chloridlösung an der Wandung eines Reagenzglases entlang fließen und beobachten Sie erneut die Farbveränderungen.

#### Anmerkungen

- Eisen -III-chlorid ist in Eisessig gelöst.
- die Schwefelsäure ist 95 - 98% ig
- Petroleumbenzin hat einen Siedebereich von 40°C - 60°C.

#### Beobachtungen und Ergebnisse

Cholesterin reagiert mit konzentrierter Schwefelsäure unter Bildung eines rötlichen Farbkomplexes. Mit Eisen – III - chlorid wird der Farbkomplex deutlich braunviolett. Die tierischen Fette, Butterfett und Schweineschmalz, zeigen die gleichen Reaktionen. Sie enthalten Cholesterin. Petroleumbenzin und die Pflanzenfette zeigen keine Reaktion.

**Tabelle 9: Cholesteringehalt in einigen Lebensmitteln (Belitz et al. 2001 S. 217)**

<b>Lebensmittel</b>	<b>Masse in mg/100g</b>
Kalbshirn	2000
Eidotter	1010
Schweinenieren	410
Schweineleber	340
Butter	240
Schweinefleisch	70 - 125
Fisch	50 - 60
Butter	280

## Die Fettfallen: Kontextaspekt 2

### *Der Jo – Jo – Effekt bei Diäten*

Wer meint, sein Gewichtsproblem lösen zu können, indem er den Fettgehalt seiner Nahrung reduziert, der kann sich unter Umständen irren. Fettzellen tragen selbst zur Begrenzung der Nahrungsaufnahme bei, indem sie das Hormon Leptin<sup>9</sup> produzieren. Leptin vermindert das Hungergefühl und führt darüber hinaus zu einer Steigerung des Energieverbrauchs (Wöckel & Schmidt 2002 S. 356). Ist die Nahrungszufuhr gering, weil eine fettarme Diät eingehalten wird, führt das dazu, dass die Fettzellen zu wenig Leptin ausschütten. Das Gehirn erhält ein vermindertes Leptinsignal. Das Hungergefühl wird dadurch verstärkt und führt nicht selten zu einer neuen Essattacke (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb.16: Jo-Jo-Effekt bei Diäten). Deshalb scheinen Diäten millionenfach zu scheitern.

Fettreduzierte Milch – und Fleischprodukte werden von der Werbebranche figur- und gesundheitsbewussten Menschen empfohlen. Dass man allerdings nur mit dem Austausch fetthaltiger Lebensmittel durch ‚Light Produkte‘ langfristig sein Gewicht halten kann, scheint Wunschdenken zu sein. Viel zu leicht suggeriert die ‚Du darfst‘ - Botschaft, dass man beliebig viel in sich hineinfuttern kann, auch wenn seriöse Anbieter davon abraten. Zwei Joghurts mit je 1,5 g Fett haben genau so viel Kalorien wie einer aus naturbelassener Milch. Die meisten kalorienreduzierten Produkte wie Halbfettbutter oder Halbfettmargarine enthalten viel Wasser. Erkennen kann man dies, wenn auf der Zutatenliste Wasser an vorderer Stelle steht. Der Ernährungswissenschaftler Udo Pollmer (2000 S. 205) weist darauf hin, dass man Kalorien nicht durch Light – Produkte ersetzen kann, sondern höchstens teuer bezahlen muss.

Die nachfolgende Tabelle gibt wieder, wie viele Kalorien beim Lieblingssport verbrannt werden, wie viele Kalorien durch die Lieblingsspeise zugeführt werden und welche fettarmen Alternativen stattdessen sich anbieten.

**Tabelle 10 : ‚Fett - Fallen‘ oder Genießen mit Köpfchen (Fit for Fun 11/99 S. 5)**

<b>Nahrungsmittel</b>	<b>Masse</b>	<b>Gesamtenergiegehalt</b>	<b>Fettkalorien</b>
	in g bzw. in L	in kcal	in kcal
Butterhalbfett	20	77	73
Butter	20	150	150
Nuss-Nougat-Creme	20	105	56
Konfitüre, kcal reduziert	19	-	
Salami	30	115	93
Lachsschinken	30	40	9
Bavaria blue 70% i. Tr.	30	125	112
Camembert 70% i. Tr.	30	65	37
Käsecreme - Suppe	0,25 L	180	117
Hühnersuppe mit Nudeln	0,25 L	36	19
Kartoffelpuffer	150	310	167
Flockenpüree	150	45	9

<sup>9</sup>griechisch: leptos, was mager bedeutet

Nahrungsmittel	Masse	Gesamtenergiegehalt	Fettkalorien
	in g bzw. in L	in kcal	in kcal
Gans	125	430	362
Putenschnitzel	125	130	9
Thunfisch	150	340	214
Seelachs	150	110	9
Schweineschnitzel paniert	125	287	121
Kalbfilet	125	120	9
Erdnüsse	50	290	232
Maronen	50	96	9
Sahnejogurt	150	185	140
Magermilchjogurt	150	65	-
Schokomüsli	50	250	65
Ballaststoffmüsli	50	150	19
Schoko - Sahne - Torte	120	470	335
Zwetschkuchen	120	216	47
Tiramisu	150	365	158
Obstsalat	150	138	-
Vollmilchschokolade	20	107	56
Frucht - Müsli - Riegel	20	75	19
Trinkschokolade	0,125	215	102
Früchtetee ungezuckert	0,125	-	-
Bier, Alt, Export, Pils	0,5	210	-
Diät - u. alkoholfreies Bier	0,5	130	-
Croissant	45 1 Stück	177	130
Roggen - Vollkornbrot	45	85	9

Tabelle 11: Fett- Killer (Fit for Fun 11/99 S. 5)

Durchschnittlicher Energieverbrauch je 10 Minuten Bewegung in kcal pro 100, 90, 80, 70, 60, 50 kg Körpergewicht						
	100 kg	90 kg	80 kg	70 kg	60 kg	50 kg
Aerobic	106	95	84	73	63	53
Badminton	120	108	95	83	71	60
Basketball	138	124	110	96	82	69
Fussball	132	118	105	92	79	66
Fitness - Training (gemischt)	184	166	148	130	111	92
Handball	144	129	114	100	86	72
Inline-Skating	120	107	95	83	71	60
Joggen 1 km in 7 min	136	121	108	95	81	68
Joggen 1 km in 5 min	208	187	166	147	125	104
Radfahren 15 Km /h	100	90	80	70	60	50
Radfahren 25 Km /h	170	153	136	119	102	85
Schwimmen (ruhig)	128	115	102	90	77	64
Schwimmen (zügig)	156	140	124	109	93	78
Segeln	50	45	40	35	30	25
Skifahren (alpin)	86	77	68	60	51	43
Skiwandern	136	122	109	95	82	68
Skilanglauf (zügig)	156	138	122	107	92	77
Snowboarding	136	122	109	95	82	68
Tanzen	68	62	4	48	41	34
Tennis	110	98	87	76	65	55
Volleyball	68	61	54	48	41	34
Walking	110	99	88	77	66	55
Windsurfen	86	77	68	60	51	43
Bügeln	33	30	26	23	20	17
Heimwerken	50	45	40	35	30	25
Putzen	65	59	52	46	39	33
Spazierengehen	60	54	48	42	36	30
Treppensteigen	135	122	109	95	82	68

## ***Experimentelle Untersuchungen:***

### ***Versuch 1, Variante A: Die quantitative Bestimmung des Fettgehalts in Nüssen***

Die Erdnuss ist eine rankende Hülsenfrucht wie die Bohne, die aber nicht an der Luft reift, sondern sich in die Erde eingräbt. Die Jahresproduktion betrug 1996 weltweit 29 Millionen Tonnen (Belitz 2001 S.732). China und Indien sind die fleißigsten Erzeuger, allerdings essen die Chinesen und Inder ihre Nüsse lieber selber. Die Ware für den europäischen Markt kommt aus den Südstaaten der USA. Das Fett der Erdnuss ist ein Triacylglycerid. Von den Fettsäuren, die mit Glycerin verestert sind, sind die Ölsäure mit nahezu 58% und die Linolsäure mit 25% die häufigsten Vertreter. Von den gesättigten Fettsäuren kommt am häufigsten die Hexadecansäure mit ca. 9% vor (Belitz 2001 S. 169).

#### Messprinzip: Extraktion

Durch Extraktion mit einem lipophilen Lösungsmittel in einer Soxhletapparatur kann das in Erdnüssen enthaltene Fett abgetrennt und der Massenanteil bestimmt werden.

#### Geräte und Chemikalien

Soxhletapparatur, Haushaltsreibe, Mörser, Pistill, Glaswolle, Petrolether (40°C – 60°C) (R 11 S 9-16-29-33), Heizpilz, Waage.

#### Versuchsdurchführung

(Baumann 1999 S.45-51, Eisenbarth et al. 1982 S. 167 – 168, Fischer & Blunk 1979 S. 169 – 171)

##### A: Extraktion des Fettes:

- Zerkleinern Sie 30 g Erdnusskerne in einem Mörser und zermahlen Sie die Bruchstücke fein.
- Wiegen Sie die leere Extraktionshülse. Geben Sie die fein gemahlene Substanz in die Hülse und wiegen Sie erneut. Die Hülse sollte etwa zu 2/3 gefüllt sein. Verschließen Sie die Hülse mit Glaswolle.
- Wiegen Sie den Destillationskolben.
- Füllen Sie den Kolben zu 2/3 mit Petrolether (40°C – 60°C) und fügen Sie einige Siedesteine hinzu und stellen Sie ihn in den Heizpilz.
- Setzen Sie den Extraktionsaufsatz auf den Kolben und verbinden Sie ihn mit dem Rückflusskühler.
- Überprüfen Sie die Kühlwasserzufuhr am Kühler und schalten Sie den Heizpilz ein.
- Die Einstellung des Heizpilzes muss nachgeregelt werden, so dass das Lösungsmittel kontrolliert siedet.
- Extrahieren sie so lange, bis das Lösungsmittel im Extraktionsaufsatz farblos wird.
- Spätestens nach 5 – 6 Stunden ist in den meisten Fällen das Fett quantitativ aus dem Erdnussmehl extrahiert.

##### B: Destillation des Lösungsmittels:

- Schalten Sie nach erfolgreicher Extraktion den Heizpilz aus.
- Lösen Sie den Soxhlethausatz vom Kühler und nehmen Sie mit einer Tiegelflange die Extraktionshülse mit verbleibender Substanz heraus.
- Legen Sie die Extraktionshülse zum Abdampfen des restlichen Lösungsmittels unter den Abzug.

- Benutzen Sie zum Abtrennen des Petrolethers die gleiche Apparatur.
- Destillieren Sie das Lösungsmittel in den leeren Extraktionsaufsatz, bis der Flüssigkeitsspiegel kurz unter den Überlaufpunkt reicht.
- Entleeren Sie das Lösungsmittel in ein Becherglas.
- Wenn nur wenige mL Rückstand im Kolben enthalten sind, stellen Sie den Kolben zum Abdampfen des restlichen Petrolethers unter den Abzug.
- Ist das Lösungsmittel vollständig abgedampft, wird der Kolben von außen gesäubert, getrocknet und gewogen.
- Ebenso gewogen wird die Extraktionshülse, und zwar mehrmals bis zur Gewichtskonstanz.

### Auswertung

1. Bestimmung Sie aus der Differenzwägung die Masse des gewonnenen Fettes.
2. Erklären Sie anhand der Druckverhältnisse die Heberwirkung im Soxhletaufsatz.
3. Berechnen Sie aus der Zuordnung von eingewogenem Erdnussmehl und gewonnenem Fett den Fettanteil in 100g Erdnüssen.
4. Geben sie an, welche Messfehler für eine eventuelle Abweichung verantwortlich sein können und schlagen Sie zur Fehlervermeidung Verbesserungen in der Versuchsvorschrift vor.
5. Wie lange müssen Sie joggen, um 100g Erdnüsse abzulaufen?

### Beobachtungen und Ergebnis

Das Lösungsmittel im Rundkolben verdampft. Der Lösungsmitteldampf kondensiert im Kühler und tropft auf das Erdnussmehl. Das Lösungsmittel löst das Fett und sammelt sich im Extraktionsaufsatz. Durch den Überlauf gelangt das fetthaltige Lösungsmittel zurück in den Rundkolben, und die Extraktion beginnt erneut. Der Einsatz der kontinuierlichen Extraktion im Aufsatz nach Soxhlet ist günstig, da das Erdnussmehl immer wieder mit frischem Lösungsmittel in Berührung kommt. Dadurch wird insgesamt weniger Lösungsmittel benötigt. Nach dem Abdestillieren des Lösungsmittels verbleibt im Kolben ein relativ dunkler Rückstand, der nach Erdnüssen riecht. Der Fettgehalt der Nüsse wird wie folgt bestimmt:

$$\text{Fettgehalt in g pro 100g} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100}{E}$$

- m1: Masse des leeren Kolbens in g  
 m2: Masse des Kolbens mit Fett in g  
 E: Einwaage des Erdnussmehls in g

Diese Rechnung vernachlässigt den Anteil des Fetts, der sich in der Extraktionshülse befindet. Soll der Anteil des Fetts in der Extraktionshülse verrechnet werden, wird zu der Massendifferenz des Kolbens die Massendifferenz der Extraktionshülse addiert und der Prozentgehalt der Einwaage bestimmt.

Der Literaturwert beträgt: 50,7% (Belitz et al. 2001 S. 734). In 100 g Erdnüsse sind 50,7 g Fett enthalten. Das sind nach der vorgegebenen Tabelle 464 kcal. Um 464 kcal abzuarbeiten müssen 37

Minuten gelaufen werden, bei einem Körpergewicht von 60 kg und bei einer Geschwindigkeit von 1 km in 5 Minuten (Fit for Fun 11/99 S. 5).

### ***Versuch 1, Variante B: Die Muskatnuss, eine ebenso fettreiche Nuss?***

Die Muskatnuss ist der Samenkern einer Frucht. Die Frucht hat Ähnlichkeiten mit einer Aprikose und wächst an einem bis zu 15m hohen Baum. Bei der Ernte werden Fruchtfleisch und Samenmantel entfernt und die harte Schale, die den Samenmantel umgibt, wird aufgeschlagen. Ursprünglich stammt die Muskatnuss aus Indonesien. Heutzutage wird sie jedoch auch in zahlreichen anderen Gebieten wie Brasilien oder Sri Lanka, vor allem aber in Westindien angebaut.

Eine große Streitfrage besteht darin, ob die Muskatnuss in Europa schon im Altertum bekannt war. Sicher ist jedoch, dass in den Mumiengräbern der Ägypter Muskatnüsse gefunden wurden und somit schon damals Nüsse aus Indonesien bis in den Mittelmeerraum gelangten. Mit der Entdeckung des Seeweges nach Indien durch Vasco da Gama begann der professionelle Handel.

Die Muskatnuss enthält als Fett die Muskatnussbutter. Es handelt sich dabei um ein Triacylglycerid. Dabei ist Glycerin bevorzugt mit der Myristinsäure verestert. Außer der Muskatbutter ist ätherisches Öl ein Fettbestandteil der Muskatnuss. Dieses Öl enthält als Wirkstoff Myristicin. Myristicin hat eine Strukturähnlichkeit mit den psychoaktiven Substanzen wie Amphetamin und Meskalin.

### Geräte und Chemikalien

Muskatnuss, Waage, Haushaltsreibe, Diethylether (R 12-19 S (2)-9-16-29-33), Glasstab, Becherglas, Heizplatte, Abzug, Propanon (R11 S(2)-9-16-23-33), Kapillare zur Schmelzpunktbestimmung, Thermometer, Becherglas, Klebestreifen.

### Versuchsvorschrift

- Wiegen Sie eine Muskatnuss und zerreiben Sie die Nuss fein.
- Übergießen Sie unter dem Abzug das Nussmehl mit 50 mL Diethylether und extrahieren Sie 10 Minuten unter leichtem Rühren. Geben Sie dabei mehrfach kleine Mengen des Ethers hinzu. Gießen Sie am Glasstab entlang.
- Filtrieren Sie in ein 100 mL – Becherglas. Lassen Sie zum Verdampfen des Ethers das Filtrat unter dem Abzug stehen. Zur Beschleunigung lassen Sie den Ether in einem Wasserbad oder auf einer Heizplatte verdampfen.
- Geben Sie zu dem Niederschlag 30 mL Propanon und erwärmen Sie auf der Heizplatte schwach, bis er sich vollständig löst. Stellen Sie das Becherglas in den Kühlschrank. Beim Erkalten scheiden sich Fettkristalle ab.
- Wiegen Sie ein Filterpapier, filtrieren Sie die Fettkristalle ab, lassen Sie sie trocknen und wiegen Sie sie zusammen mit dem Papier bis zur Gewichtskonstanz.

### Auswertungen

1. Berechnen Sie den Anteil des Fetts in der Einwaage.
2. Bestimmen Sie den Schmelzpunkt des Fettes und deuten Sie das Ergebnis.
3. Nennen Sie Eigenschaften des benutzten Ethers und erläutern Sie den vorgenommenen Extraktionsvorgang auf der Teilchenebene.

4. Erklären sie mit Hilfe von Struktur- und Bindungseigenschaften die Lösungseigenschaften von Propanon und begründen Sie Versuchsschritt 4.

#### Anmerkung

Den Schmelzpunkt können Sie mit Hilfe einer Kapillare bestimmen, deren untere Öffnung Sie mit dem gewonnenen Fett füllen. Befestigen Sie die Kapillare am Thermometer, das in einem Wasserbad steht. Der Schmelzpunkt ist erreicht, wenn die weiße Farbe des Fetts verschwindet.

#### Beobachtungen und Ergebnisse

Der Fettgehalt der Muskatnuss beträgt nach Literaturangaben zwischen 25% und 40% (Braun 1974 S. 18). Der mittlere Fettgehalt unter experimentellen Bedingungen in der Schule, liegt bei ca. 12%. Beim Muskatnussfett handelt es sich um einen Reinstoff. Der Schmelzpunkt des Fettes beträgt im Schülerversuch im Mittel 53°C. Als Literaturwert wird ein Wert von 55°C – 56°C angegeben.

Die Löslichkeit des Fettes in Diethylether ist auf der molekularen Ebene durch die Ausbildung von van-der-Waals – Kräften zu begründen. Durch das Filtrieren werden die nicht gelösten Stoffe des Nussmehls beseitigt. Im Filtrat befinden sich das Fett und andere verunreinigende Stoffe, die im Diethylether löslich sind. Propanon kann im Gegensatz zu Diethylether neben unpolaren Stoffen auch polare Stoffe lösen. Der Rückstand, der nach dem Verdampfen des Diethylethers übrigbleibt, löst sich unter leichtem Erwärmen in Propanon. Wird die Lösung in den Kühlschrank gestellt, fällt das Fett aus. Das Fett ist durch die langen Carbonsäureester im Vergleich zu den Verunreinigungen relativ unpolar und ist daher bei niedrigen Temperaturen nicht mehr in Propanon löslich, während die Verunreinigungen in der Lösung bleiben. Beim Filtrieren bleibt das Fett im Filter zurück. Die übrigen Verunreinigungen liegen gelöst im Filtrat vor.

### ***Versuch 1, Variante C: Der Fettgehalt von Schokolade***

#### ***a) Kaltextraktion***

##### Geräte und Chemikalien

250 mL - Bechergläser, Reibe, Rührstab, Filter mit passendem Filterpapier, 10 mL - Pipette mit Pipettierhilfe, Waage, Magnetrührer, Löffel, Abzug, Schutzbrille, 3 Schokoladensorten, Aceton (R 11 S (2)-9-16-23-33).

##### Durchführung

- Zerkleinern Sie etwa vier Stücke Schokolade mit der Reibe.
- Wiegen Sie 10 g der Schokolade in ein 250 mL - Becherglas genau ein.
- Geben Sie mit Hilfe der 10 mL – Pipette 30 mL Aceton hinzu.
- Filtrieren Sie die Lösung in ein zuvor gewogenes Becherglas.
- Lösen Sie das Fett bei geringer Temperatur auf einer Heizplatte und stellen Sie den Magnetrührer an.
- Stellen Sie das Becherglas über Nacht unter einen Abzug.
- Wiegen Sie das Becherglas mit dem Fett am nächsten Tag.

## Auswertungen

1. Bestimmen Sie die Masse des Fetts und den Fettgehalt der Schokolade in g/100 g.
2. Vergleichen Sie Ihre Messwerte mit Literaturwerten und erklären Sie die Abweichungen.

## Beobachtungen und Ergebnis

Nach der Lösungsmittelzugabe und etwas Rühren sind die Schokoladenspäne nicht mehr zu erkennen. Wird die Lösung zwei Minuten nicht gerührt, so werden zwei Phasen deutlich: Die obere ist trübe und leicht gelblich, die untere undurchsichtig und je nach Schokoladenart braun oder weißlich. Nach dem Abdampfen des Lösungsmittels liegt das Fett im festen Zustand vor. Es ist leicht gelblich.

**Tabelle 12: Fettgehalt verschiedener Schokoladensorten - Kaltextraktion (Bader et. al. 1997 S. 2-9)**

	m(Becherglas) in g	m(Becherglas mit Fett) in g	m(Fett) in g	Fettgehalt in % (exp.)	Fettgehalt in % (Lit)
Weißer Schokolade	89,13	91,44	2,31	23,1	27,91
Vollmilchschokolade	103,16	105,61	2,45	24,5	28,61
Blockschokolade	103,35	105,47	2,12	21,2	21,68

## ***b) Heißextraktion***

### Geräte und Chemikalien

Reibe, 250 mL – Bechergläser, 25 mL – Pipette mit Pipettierhilfe, Rückflusskühler, 2 Gummischläuche, Stativstange mit Klammer und Muffe, Heizpilz, Rundkolben, Rührstab, Waage, Löffel, Filter mit passendem Filterpapier, Schutzbrille, 3 Schokoladensorten, n-Heptan (R 11 S (2)-9-16-23-29-33), Aceton (R 11 S (2)-9-16-23-33), Siliconpaste, Siedekugeln, Kühlwasser, Liebigkühler mit Thermometer und Stopfen, Auffangkolben, Petrischale, Aceton, Schutzbrille, Abzug

### Durchführung

- Zerkleinern Sie mit Hilfe einer Reibe zwei bis vier Schokoladenstücke.
- Wiegen Sie in ein 250 mL - Becherglas etwa 5 g der geriebenen Schokolade genau ein.
- Fügen Sie in das Becherglas mit Hilfe der 250 mL – Pipette 100 mL n-Heptan hinzu, so dass sich die geriebene Schokolade darin löst.
- Geben Sie die Lösung vollständig in einen zuvor gewogenen Rundkolben und spülen Sie das 250 mL – Becherglas mit dem Lösungsmittel aus.
- Fügen Sie einige Siedeperlen in den Rundkolben.
- Der Rundkolben wird in den Heizpilz gesetzt, und der Heizpilz wird an der Stativstange befestigt.
- Setzen Sie den Rückflusskühler in den Rundkolben und schließen Sie die Wasserschläuche an.
- Verbinden Sie einen Schlauch mit dem Wasserhahn, den anderen lassen Sie im Abflussbecken enden. Stellen Sie das Kühlwasser an.
- Erhitzen Sie die Lösung im Rundkolben auf niedrigster Stufe des Heizpilzes ca. 15 – 30 Minuten lang.
- Filtrieren sie nach kurzem Abkühlen die Lösung für die anschließende Destillation in einen weiteren Rundkolben. Der Filtrückstand wird aufbewahrt.
- Befestigen Sie den Liebigkühler mit der Muffe und der Klammer am Stativ.
- Schließen Sie an den Zulauf und den Ablauf des Kühlers die Wasserschläuche an.
- Befestigen Sie den Auffangkolben mit Hilfe einer Klemme am Ende des Liebigkühlers.

- Stecken Sie in die beiden nach oben zeigenden Öffnungen Thermometer und Stopfen.
- Setzen Sie den Rundkolben, den Sie beim Rückflussverfahren benutzt haben, in den Heizpilz.
- Erhitzen Sie das Gemisch auf etwa 70°C und kontrollieren Sie die Temperatur am Thermometer.
- Die Destillation ist beendet, wenn kein Lösungsmittel mehr in den Auffangkolben tropft.
- Lassen Sie den Rundkolben über Nacht im Abzug stehen, so dass das Lösungsmittel noch abdampfen kann.
- Wiegen sie am nächsten Tag den Rundkolben erneut.

### Auswertungen

1. Bestimmen sie die Masse des Fetts und den Fettgehalt in der Schokolade in g/100g.
2. Vergleichen Sie Ihre Messwerte mit Literaturwerten und erklären Sie die Abweichungen.

**Tabelle 13: Fettgehalt verschiedener Schokoladensorten - Heißextraktion**

	m(Kolben) in g	m(Kolben mit Fett) in g	m(Fett) in g	Fettgehalt in % (exp.)	Fettgehalt in % (Lit)
Weißer Schokolade	77,45	78,64	1,19	23,8	27,91
Vollmilchschokolade	48,00	49,28	1,28	25,6	28,61
Blockschokolade	50,03	51,03	1,00	20,00	21,68

### ***Versuch 2: Die Bestimmung des Energiehalts von 100 g Olivenöl in einem***

***Verbrennungskalorimeter nach Theimann mit vorgegebener Wärmekapazität (Eisenbarth et al. 1982 S. 119, Stübs 1998 S. 79)***

### Versuchsdurchführung

- Füllen Sie in das Kalorimeter 500 mL Wasser ein, saugen Sie mit einer Wasserstrahlpumpe gleichmäßig Luft durch und messen Sie nach Temperatenausgleich die Ausgangstemperatur.
- Füllen Sie in die Spirituslampe ca. 3 mL Öl ein. Verschließen Sie die Spirituslampe mit einer Kappe und wiegen Sie sie ab.
- Entzünden Sie das Öl am Docht, stecken Sie das Lämpchen schnell ins Kalorimeter, so dass das Luftloch im Schaft frei bleibt. Stellen Sie die Luftzufuhr durch die Wasserstrahlpumpe so ein, dass die Flamme gleichmäßig brennt. Rühren Sie, bis die Temperatur um 4 K gestiegen ist.
- Löschen Sie die Flamme durch Abstellen der Luftzufuhr, setzen Sie die Kappe auf die Spirituslampe auf. Stellen Sie den Zeitpunkt des Löschens fest.
- Messen Sie den Temperatur - Zeitverlauf bei ständigem Rühren alle 30 s weitere 5 Minuten lang und protokollieren Sie Ihre Messwerte.
- Bestimmen Sie die Masse des verbrannten Öls durch Zurückwiegen.

### Auswertungen

1. Tragen Sie die Temperatur über die Zeit in einem Temperatur-Zeit-Diagramm auf.
2. Bestimmen Sie die Verbrennungsenthalpie des Öls.

### Ergebnisse

Bei einer Masse von 0,33 g verbranntem Olivenöl wird eine Temperaturdifferenz von 5,3 K gemessen.

### **Berechnung des chemischen Brennwertes in kJ/100 mL:**

gegeben: Die Wärmekapazität des Kalorimeters beträgt  $2,43 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$$\Delta T = 5,3 \text{ K}$$

$$m(\text{Olivenöl}) = 0,33 \text{ g}$$

$$\rho(\text{Olivenöl}) = 0,92 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}.$$

gesucht:  $\Delta_{\text{Rh}}$  in  $\text{kJ}\cdot\text{mL}^{-1}$ .

Lösung:

$$\Delta_{\text{Rh}} = \frac{2,43 \cdot \Delta T}{v(\text{Olivenöl})}$$

$$\Delta_{\text{Rh}} = -35,87 \text{ kJ /mL}$$

$$\Delta_{\text{Rh}} = - 3587 \text{ kJ/100 mL (chemischer Brennwert)}$$

Um den physiologischen Brennwert zu erhalten, muss der experimentell ermittelte, chemische Brennwert mit dem physiologisch verwertbaren Anteil multipliziert werden. Für Olivenöl wird ein Faktor von 0,93 angegeben.

$$\Delta_{\text{Rh}} = - 3336 \text{ kJ /100 mL (physiologischer Brennwert)}$$

### **Versuch 3: Bestimmung der Wärmekapazität des Verbrennungskalorimeters mit 2 – Propanol (R11 S (2)-7-16) (Stübs 1998 S. 79)**

#### Versuchsdurchführung:

- Füllen Sie das Verbrennungskalorimeter bis zu einer am oberen Rand gekennzeichneten Markierung mit Wasser und saugen Sie mit einer Wasserstrahlpumpe einen kräftiger Luftstrom durch.
- Geben Sie etwa 3 mL 2 - Propanol in das zum Verbrennungskalorimeter gehörende Verbrennungslämpchen mit Docht, verschließen Sie es mit der Kappe, setzen Sie es auf einen speziellen Stopfen und wiegen Sie es.
- Bei ständigem Rühren des Kalorimeterwassers messen Sie die Temperatur 200 s in der Vorphase.
- Dann entzünden Sie 2 - Propanol im Luftstrom bei ständigem Rühren des Kalorimeterwassers. Die Luftzufuhr wird so eingerichtet, dass die Flamme gleichmäßig brennt (Hauptperiode).
- Wenn die Temperatur um ca. 4 K gestiegen ist, wird die Flamme durch Abstellen der Wasserstrahlpumpe gelöscht, Setzen Sie die Kappe auf das Lämpchen. Die Temperatur wird in der Nachperiode etwa 200 s lang verfolgt. Die Masse des verbrannten 2 - Propanols bestimmen Sie durch erneutes Wiegen des Lämpchens. 10 Eichungen mit 2 - Propanol sind durchzuführen.
- Die Temperatur wird in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt.

#### Auswertungen

1. Ermitteln Sie die Temperaturdifferenz.
2. Bestimmen Sie die Wärmekapazität des Kalorimeters.

## Ergebnisse

Bei der Verbrennung von 2 – Propanol wird eine bestimmte Wärmemenge frei, die auf das Kalorimeterwasser und die Kalorimeteranordnung übertragen werden kann. Aus den Temperaturdifferenzen und der verbrannten Masse an Isopropanol kann die Wärmekapazität des Kalorimeters bestimmt werden.

gegeben:  $\Delta_R H_{(2\text{-Propanol})} = -2003 \text{ kJ/mol}$

$$m_{(2\text{-Propanol})} = 0,35 \text{ g}$$

$$\Delta T = 4,8 \text{ K}$$



gesucht:  $c_K$  in  $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$$\text{Lösung: } \Delta_R H = \frac{(cp(H_2O) \cdot m(H_2O) + k) \cdot \Delta T}{n(2\text{-Pr opanol})}$$

$$\Delta_R H = \frac{c_K \cdot \Delta T}{n(2\text{-Pr opanol})}$$

$$c_K = \frac{\Delta_R H \cdot n(2\text{-Pr opanol})}{\Delta T \cdot M(2\text{-Pr opanol})}$$

$$c_K = 2,43 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$$

## **Der Traum vom Verzehr ohne Verzicht: Kontextaspekt 3**

Fetteiche Nahrung, mangelnde Bewegung und nicht selten häufige Diäten führen zur Fettleibigkeit, die mit gesundheitlichen Risiken verbunden ist. Eine über die Norm hinausgehende Vergrößerung des Fettgewebes ist eine Erkrankung, die Adipositas genannt wird. Definiert wird die Adipositas über die Größe des Körper-Masse-Index. Der Körper – Masse – Index wird auch als BMI (engl. body mass index) bezeichnet.

Legt man den BMI zugrunde, sind 37,6 % der Deutschen übergewichtig (FR 1998 14. August, Aus aller Welt), weil sie einen Wert zwischen 25 und 29,9 aufweisen. Als behandlungsbedürftig gelten Patienten ab einem BMI von 30. Eine Reihe von Studien haben ergeben, dass in Deutschland etwa 13% der Bevölkerung adipös ist. Da mit der Adipositas Erkrankungen einher gehen wie Diabetes und Bluthochdruck - um nur einige zu nennen -, die zusammen genommen aber hohe Kosten verursachen und zu einer Verkürzung der Lebenserwartung führen, handelt es sich bei Adipositas um eine ernstzunehmende Erkrankung, die behandelt werden muss.

## ***Der Körper – Masse – Index***

Das Überangebot an Nahrungsstoffen ist der Auslöser für Zunahme von Übergewicht, die in nahezu allen Ländern mit hohem Lebensstandard zu beobachten ist (Luczak 1999 S. 56). Fetteiche Nahrung, mangelnde Bewegung und nicht selten häufige Diäten führen zur Fettleibigkeit, die mit gesundheitlichen Risiken verbunden ist. Die Größe des Körper-Masse-Index ist ein zur Zeit

übliches Maß zur Einschätzung des Körpergewichtes. Er errechnet sich durch Division des Körpergewichtes durch das Quadrat der Körpergröße in Meter.

$$\text{BMI} = \frac{\text{Körpergewicht}}{(\text{Körpergröße})^2} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Dabei gelten folgende Grenzwerte n  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  für 19 – 24 Jährige

BMI	unter 17,5	Magersucht
BMI	20-24:	Normalgewicht
BMI	25-29:	Übergewicht
BMI	30-39:	Adipositas <sup>10</sup> Grad II
BMI	über 40:	Extreme Adipositas Grad III (Wöckel & Schmidt 2002 S. 363)

**Tabelle 14: Speicherung von Nährstoffen bei Normalgewichtigen und extrem Übergewichtigen (Löffler et al. 2001 S. 291)**

	normalgewichtig		extrem übergewichtig	
	Masse in g	Brennwert in kJ	Masse in g	Brennwert in kJ
<b>Fett</b>	15.000	590.000	bis 80.000 und mehr	3.160.000
<b>Glykogen</b>	400	7.000	400	7000
<b>Protein</b>	6000	101.000	8.000	134.000

### ***Das Wunder der Fettverdauung***

Die Dünndarmhaut ist in zahlreiche Schleifen gefaltet und zu Zotten aufgeworfen, die ihrerseits von Bürstensaumzellen bedeckt sind. Die Produkte der Lipasespaltung, wozu freie Fettsäuren, Glycerin aber auch Di- und Monoacylglycerine gehören, wandern in die Bürstensaumzellen der Dünndarmzotten. Dort werden sie wieder zu Triacylglycerinen resynthetisiert und ins Blut und ins Lymphsystem abgegeben. Sie liegen in einer besonderen Transportform vor. Triacylglycerine und Cholesterine bilden zusammen mit Proteinen einen spezifischen Lipoprotein – Verband, der den Transport in den Körperflüssigkeiten ermöglicht. Die Transportform wird Chylomikron genannt.

Schon ein bis zwei Stunden nach einer fetthaltigen Nahrung wird das Blut geradezu mit Chylomikronen überschwemmt, allerdings nicht lange. Denn die Chylomikrone gelangen über die Blutbahn und die Lymphe zum Muskel- und Fettgewebe. In den Kapillargefäßwänden dieser Gewebe sitzen fettspaltende Enzyme, Lipasen, die an die Oberflächenproteine der Chylomikronen andocken und sich mit angelieferten Depotfetten versorgen, so dass diese erneut in Fettsäuren und Glycerin aufgespalten werden. Die Überreste der Chylomikronen, deren Vorräte an verseifbarem Fett nahezu erschöpft sind, enthalten noch Vitamine und Cholesterin und gelangen mit ihrer

<sup>10</sup>eine Adipositas liegt bei einem BMI von über 30 kg/m<sup>2</sup> vor.

reduzierten Fracht so über die Blutbahn in die Leber (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb.18: Micellen und Chylomikrone, Abb.20: LDL- und HDL-Lipoproteine).

### ***Die Aktivierung der Lipasen***

In einer wässrigen Umgebung mit neutralem pH – Wert und Körpertemperatur - Bedingungen, wie sie im Inneren von Zellen, im Blut und in der Lymphe vorliegen - sind die meisten Moleküle stabil und die erforderlichen Reaktionen, die das Überleben der Zellen und damit des Organismus sichern, laufen nicht ab, obwohl sie prinzipiell ablaufen könnten. Enzyme lösen das Problem, indem sie eine Umgebung bereitstellen, in der die nötigen Reaktionen begünstigt ablaufen. Das Hauptmerkmal einer Reaktion, die durch ein Enzym beschleunigt wird, liegt darin, dass sie im Inneren der Enzymtasche abläuft, die man aktives Zentrum bezeichnet. Das vom aktiven Zentrum gebundene Molekül, auf das das Enzym einwirkt, wird als Substrat bezeichnet.

Die Enzym – Substrat – Wirkung wird in zwei Modellvorstellungen beschrieben. Emil Fischer schlug 1894 vor, dass Enzyme eine zu ihren Substraten komplementäre Struktur besitzen und so wie ein Schlüssel zum Schloss passen. Diese Vorstellung von einer spezifischen Wechselwirkung zwischen zwei Molekülen, die durch Oberflächen mit komplementären Formen vermittelt wird, ist weiterentwickelt worden. Heute nimmt man an, dass das aktive Zentrum der Enzyme in seiner Form variiert wird, wenn sich ein Substrat anlagert. Die passende Form wird erst dann angenommen, wenn sich ein Substrat anlagert.

Eine einfache enzymatische Reaktion mit dem Enzym E, dem Substrat S und dem Produkt P wird wie folgt beschrieben:



Der Enzym – Substrat – Komplex ist das charakteristische Merkmal, das enzymatische Reaktionen von anderen Reaktionen unterscheidet. Nähert sich ein Substrat einem Enzym, dessen aktives Zentrum komplementär zur Struktur des Substrates ist, werden intermolekulare Bindungen ausgebildet. Wasserstoffbrückenbindungen, ionische Bindungen und van–der-Waals - Bindungen sorgen für die kurzfristige Stabilität des Enzym – Substrat - Komplexes. Die Wirksamkeit eines Enzyms hängt davon ab, wie stark die intermolekularen Kräfte sind, die das aktive Zentrum mit dem entsprechenden Substrat aufbauen und optimieren kann.

Zum aktiven Zentrum des aus 449 Aminosäuren bestehenden Enzyms Lipase gehört die Aminosäure Serin an der Position 152, die durch eine Art Klappe verschlossen ist und daher im inaktiven Zustand keine Fettmoleküle spalten kann. Erst die Anbindung einer Colipase an eine weitere Bindungsstelle, dem regulatorischen Zentrum, bewirkt, dass der Verschluss des aktiven Zentrums sich öffnet. Damit wird das aktive Zentrum freigelegt und ermöglicht somit der Lipase

den Zugriff auf das Triacylglycerid. Die Bindung der Colipase wird zusätzlich durch Gallensäuresalze beschleunigt (Guercioli 1997 S. 15).

Sobald der Nahrungsbrei im Zwölffingerdarm, dem ersten Dünndarmabschnitt, angekommen ist, wird er von Säuren aus der Gallenblase umgeben. Die Gallensäuren sind Emulgatoren, die das Fett in Tröpfchen fein verteilen, so dass den Lipasen eine große Angriffsfläche geboten wird. Die Lipasen spalten aus den Fetten einzelne Fettsäuren heraus, die Mizellen bilden. Gemeinsam mit den Gallensäuren und ihren Salzen sorgen die Micellen dafür, dass alle Lipide - also auch die unverseifbaren Fette der Nahrung, wie Vitamine und Cholesterin - von den Darmzellen aufgenommen werden (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb: Micellen und Chylomikrone).

Aufgrund ihrer Größe von nur 20 – 50 nm ermöglichen die Mizellen den lipophilen Spaltprodukten einen guten Kontakt mit der Darmwand und schaffen damit die Voraussetzung für ihre Diffusion in die Darmwandzellen. Alle unpolaren Lipide, wie Cholesterin und fettlösliche Vitamine, befinden sich im Inneren der Mizellen, während die polaren bzw. ionisierten Gruppen der Fettsäuren nach außen weisen und die Oberfläche der Mizellen bilden. Fettsäuren und andere Abbauprodukte werden von der Dünndarmschleimhaut aufgenommen und erneut in Triacylglycerine umgewandelt. Die Triacylglycerine werden zusammen mit Cholesterin und Proteinen in die Chylomikrone eingebaut. Die Oberfläche eines Chylomikrons besteht aus einer Schicht von Phospholipiden, deren polare Gruppen der wässrigen Phase zugewandt sind. Triacylglycerine sind in das Innere der Chylomikrone ausgeschieden worden. Verschiedene Proteine, die aus der Oberfläche herausragen, kommunizieren mit dem wässrigen Außenmedium über Botenstoffe und sind am Stoffwechsel in den Chylomikronen und an der Stoffaufnahme beteiligt (vgl. Anhang S. 4 Abbildungen 18 und 20).

### ***Xenical®, die Wunderpille zum Abnehmen***

Fettreich essen und trotzdem abnehmen, eine Pille vor jeder Mahlzeit soll es möglich machen. Das Fett, das mit der Nahrung in den Körper gelangt, wird ausgeschieden ohne verdaut zu werden. Handelt es sich dabei um eine Anti – Fett – Pille, die Wunder bewirkt, ohne dass man den Lebensstil ändert? Es wäre der Traum vieler, ausgiebig zu schlemmen ohne die Folgen zu spüren, da ein hilfreiches Lifestyle – Mittel bereit liegt, das die Essattacke nahezu folgenlos macht.

Xenical® kann laut Herstellerfirma über einen langen Zeitraum genommen werden, da keine Nebenwirkungen auftreten sollen, ausgenommen ein breiiger Stuhl. Nach Aussage des Pressesprechers der Herstellerfirma haben klinische Studien gezeigt, dass nach einer einjährigen Behandlung Patienten durchschnittlich 10% bis 16 % ihres Gewichtes abgenommen hätten (Wehr 2000 S. 3).

Ernährungsforscher schätzen Xenical ® unterschiedlich ein. Anette Braun von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung zeigte sich skeptisch, als das Medikament 1998 auf den Markt kam.

Nach ihrer Auffassung werde die Pille allein sicher nichts bringen. Wer den Fettgehalt in der Nahrung konsequent reduziere, das Essverhalten ändere, sich regelmäßig bewege, nehme auch ohne Pille langfristig, dauerhaft und ohne Nebenwirkungen ab (FR – Aus aller Welt, Freitag 14. August 1998).

### ***Die Wirkungsweise von Orlistat***

Das Medikament mit dem Namen Xenical® enthält den Wirkstoff Orlistat. Orlistat hemmt die Lipasen im Darmtrakt und verhindert somit die Spaltung der Fette in ihre Bestandteile. Nach oraler Aufnahme vermischt sich Orlistat im Magen mit den Fetttropfen. Im Darm zeigt sich die therapeutische Wirkung. Orlistat ist in seiner Struktur den Triacylglycerinen sehr ähnlich und vermag damit eine Bindung mit der Lipase einzugehen. Orlistat entfaltet seine therapeutische Wirkung, indem es mit dem Serinrest im aktiven Zentrum reagiert. Da die Lipasen den substratähnlichen Stoff nicht spalten können, bleibt das jeweilige aktive Zentrum für die Anlagerung von Triacylglycerinen blockiert. Da unverdaute Triacylglycerine nicht von der Darmwand aufgenommen werden können, wandern sie durch den Darm und werden unverändert im Stuhlgang ausgeschieden. Durch das Medikament wird damit die Fettresorption im Dünndarm vermindert.

Nach Information des Herstellers hilft Xenical® übergewichtigen Menschen, ihr Gewicht zu reduzieren und das reduzierte Gewicht beizubehalten, wenn zur medikamentösen Behandlung zusätzlich eine gesunde Lebensweise mit fettnormalisierter Ernährung und sportlicher Betätigung eingehalten wird. Ärzte glauben, dass das Medikament eine kurzzeitige Hilfe sein kann für stark übergewichtige Menschen, um den Einstieg in eine gesündere Lebensform zu erleichtern<sup>11, 12</sup>.

Die Stärke der Nebenwirkungen hängt nach Auffassung des Herstellers stark von der Fettmenge ab, die mit der Nahrung aufgenommen wird. Fettige Durchfälle kombiniert mit Blähungen und Bauchschmerzen sollen dann auftreten, wenn der Patient sich nicht daran hält, weniger als 60 – 80 g Fett zu sich zu nehmen.

### ***Versuch 1: Fettabbau durch Enzyme (Demuth et. al. 1995 S. 59)***

#### Geräte und Chemikalien

Drei 100 mL – Erlenmeyerkolben, 250 mL – Becherglas, 10 mL – Pipetten, Tropfpipette, Trockenschrank, Bürette, Heizplatte, Messzylinder,

Lipase in einer Tensidmischung von der Fa. Spinnrad, Ethanol (R 11 S (2)-7-16), Natronlauge c = 0,1 mol/L (R 35 S (1/2)-26-37/38-45), Phenolphthaleinlösung.

#### Versuchsdurchführung

- Mischen Sie in einem Erlenmeyerkolben 5 g Öl und 3 g Enzymlösung mit 25 mL Ethanol.

<sup>11</sup> [www.hrz.uni-giessen.de/nutriinfo/xenical.htm](http://www.hrz.uni-giessen.de/nutriinfo/xenical.htm) (27.03.2001)

<sup>12</sup> [www.dr.-walser.ch/index.html?adipositas.htm](http://www.dr.-walser.ch/index.html?adipositas.htm) (20.06.2003)

- Pipettieren Sie 10 mL dieser Emulsion ab und bringen Sie diese auf einer Heizplatte zum Sieden.
- Stellen Sie die verbleibende Emulsion 30 Minuten in den Trockenschrank bei einer Temperatur von 40°C. Während der Reaktionszeit müssen Sie die Emulsion mehrmals schütteln.
- Nach 30 Minuten erhitzen Sie die Emulsion bis zum Sieden.
- Titrieren Sie beide Proben mit Natronlauge  $c = 0,1 \text{ mol/L}$  gegen Phenolphthalein.
- Notieren Sie Ihre Messwerte.

#### Auswertungen

1. Formulieren Sie das Reaktionsschema der Titration.
2. Bestimmen Sie die Konzentration der Säure in beiden Proben in mol/L.
3. Begründen Sie die Titration der abpipettierten Emulsion von 10 mL.
4. Erklären Sie das Siedenlassen des Reaktionsgemisches.

#### Ergebnisse

Die Triacylglycerine des Öls werden durch die Lipase gespalten. Es entstehen freie Fettsäuren und Glycerin. Die Fettsäuren werden titrimetrisch bestimmt. Aus dem Verbrauch an Natronlauge zu Beginn der Reaktionszeit lässt sich die Konzentration der in den Ölen vorhandenen, freien Fettsäuren bestimmen, die schon vor der Lipaseeinwirkung vorhanden waren. Aus dem Differenzwert zwischen dem Anfangsverbrauch und dem Verbrauch nach 30 Minuten lässt sich die Konzentration der Fettsäuren erschließen, die durch die Lipasetätigkeit entstanden sind. Durch das Sieden der Emulsion wird die Tertiärstruktur der Enzyme gestört und die Enzymaktivität unterbunden.

### ***Versuch 2: Emulgierende Wirkung von Gallensäuren***<sup>13</sup>

#### Geräte und Chemikalien

2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Pflanzenöl, Cholsäuresalz, Sudan III – Lösung, Cholsäuresalzlösung ( $w = 20\%$ ).

#### Versuchsvorschrift

- Geben Sie in ein Reagenzglas 5 mL Wasser in das andere 5 mL Cholsäuresalzlösung ( $w = 20\%$ ).
- Geben sie in beide Reagenzgläser einen Tropfen frisches Pflanzenöl.
- Färben Sie die Mischung mit 0,5 mL gesättigter ethanolischer Sudan-III - Lösung an.
- Verschließen sie beide Reagenzgläser mit einem Gummistopfen und schütteln Sie kräftig.
- Notieren sie Ihre Beobachtungen.

#### Auswertungen

Werten sie Ihre Beobachtungen aus. Gehen sie dabei auf die Struktur der Cholsäure und ihrer Salze ein.

#### Beobachtungen und Ergebnisse

Im Reagenzglas mit der Cholsäuresalzlösung stellt sich eine stabile Emulsion ein. Die flüssige Phase ist gleichmäßig rot gefärbt. Im Reagenzglas mit Wasser beginnt nach wenigen Minuten die

<sup>13</sup> [http://dc.2.uni-bielefeld.de/dc2/tip/10\\_00.htm](http://dc.2.uni-bielefeld.de/dc2/tip/10_00.htm) (20.06.2003)

Entmischung, wobei Fetttröpfchen an der Glaswand zu sehen sind. Die Glaswand des Reagenzglases mit Cholsäuresalzlösung ist klarer. Damit eine Substanz emulgierend wirken kann, müssen ihre Moleküle polare und unpolare Bereiche aufweisen. Im dreidimensionalen Strukturbild der Cholsäure ist sichtbar, dass das Molekül auf der einen Seite die polaren und auf der gegenüberliegenden Seite die unpolaren Gruppen trägt.

### ***Cholsäurelösung und Wasser im Vergleich***

Im Vergleich zu Wasser sinkt in 1%iger Cholsäuresalzlösung feines Schwefelpulver zu Boden. Die Oberflächenspannung wird durch Cholsäuresalzlösung herabgesetzt. Wird hingegen auf die Oberfläche einer mit Wasser gefüllten Kristallisierschale Schwefelblume mit einem Teesieb gestreut, so bedeckt die Schwefelblume die Wasseroberfläche. Wird ein Tropfen einer 1%igen Gallensäuresalzlösung hinzugefügt, so wird beim Eintreten des Tropfens die Schwefelblume verdrängt.

Die primäre Wirkung der Cholsäuresalze beruht auf der Erhöhung der Entropie des Systems. Cholsäuresalzionen ohne Fettkontakt sind zunächst sowohl an ihrer polaren wie an ihrer unpolaren Seite von Wassermolekülen umhüllt. Kommen die Cholsäuresalzionen mit Lipiden in Kontakt, bilden sich van-der-Waals – Bindungen zwischen den unpolaren Teilen der Cholsäuresalzionen und den Fetten aus. Dadurch werden von der unpolaren Seite der Cholsäuresalzionen die Wassermoleküle abgedrängt. Diese sind damit beweglicher geworden. Durch die Emulgatoren entstehen anstatt einer einzigen Fettoberfläche viele kleine Fettkügelchen mit einer insgesamt viel größeren Oberfläche. Damit nimmt die Entropie des Systems zu und die Entropieänderung ist positiv.

### ***Versuch 3: Verdauung von Fetten mit und ohne Orlistat***

#### Geräte und Chemikalien:

Sahne mit einem Fettgehalt von 30%, Gallensäure in Form des Medikaments Cholecysom®, Lipase in Form des Medikaments Lipazym®, Orlistat in Form des Medikaments Xenical®, Natronlauge pH = 10 (R 34 S (1/2)-26-37/38-45), Reagenzglasständer, Reagenzgläser, Pipetten mit Pipettierhilfen, Magnetrührer, Rührkern.

#### Versuchsdurchführung

- Zerkleinern Sie je eine Tablette Cholecysom®, Lipazym® und Xenical®.
- Lösen Sie die folgenden Substanzen mit Hilfe eines Magnetrührers:
  - die Lipase in 20 mL Wasser,
  - die Gallensäure in verdünnter Natronlauge und
  - Xenical® in verdünnter Natronlauge.
- Stellen Sie die Sahne und die o.g. Lösungen auf einen pH – Wert von 10 mit Natronlauge ein.
- Füllen Sie vier Reagenzgläser mit je 5 mL Sahnelösung und ca. 20 Tropfen Phenolphthalein. Rühren Sie, so dass die Lösungen rosa gefärbt sind.
- Füllen Sie vier Reagenzgläser wie folgt:

Reagenzglas 1 mit 6 mL Natronlauge,  
 Reagenzglas 2 mit 5 mL Natronlauge,  
 Reagenzglas 3 mit 5 mL Gallensäure,  
 Reagenzglas 4 mit 4mL Gallensäure und 1 mL Orlistat.

- Fügen Sie zuletzt zum zweiten, dritten und vierten Reagenzglas jeweils 1 mL Lipaselösung hinzu und notieren Sie Ihre Beobachtungen.

**Tabelle 15: Pipettierschema zur Verdauung mit und ohne Orlistat**

	Reagenzglas 1	Reagenzglas 2	Reagenzglas 3	Reagenzglas 4
Sahnelösung	5 mL	5 mL	5 mL	5 mL
Phenolphthalein	20 Tropfen	20 Tropfen	20 Tropfen	20 Tropfen
Natronlauge	6 mL	5 mL		
Gallensäurelösung			5 mL	4 mL
Orlistatlösung				1 mL
Lipaselösung		1 mL	1 mL	1 mL

### Variation

Variieren Sie die Zugaben, indem Sie in das erste Reagenzglas zusätzlich 1 mL Natronlauge, in das zweite Reagenzglas 1 mL Lipase, in das dritte Reagenzglas 1 mL Natronlauge und in das vierte Reagenzglas 1 mL Orlistat geben. Notieren sie Ihre Beobachtungen.

### Auswertungen

1. Erklären Sie Ihre Beobachtungen.
2. Entwickeln Sie weitere Kontrollexperimente und führen Sie sie durch.
3. Beschreiben Sie die Fettverdauung mit und ohne Medikament.
4. Begründen Sie, warum eine alkalische Sahnelösung ausgewählt wurde.
5. Erklären Sie die Wirkung von Orlistat auf der Teilchenebene.
6. Warum geht mit Xenical® der Traum vom Verzehr ohne Verzicht nicht in Erfüllung?

### Beobachtungen und Ergebnisse

Die rosafarbene Emulsion in Reagenzglas 1 bleibt unverändert. Im dritten Reagenzglas nimmt die Färbung des Indikators schnell ab. Bereits nach etwa einer halben Minute ist die Emulsion milchig weiß gefärbt. Der gleiche Prozess läuft im zweiten Reagenzglas sehr viel langsamer ab und erst nach einigen Minuten und weiterer Zugabe von Lipase verliert die Emulsion ihre Farbe. Im Reagenzglas 4 findet keine Entfärbung statt, nur zu Beginn zeigt sich an der Oberfläche eine weiße Schicht. Nach erneutem Hinzufügen von Orlistat bleibt die Flüssigkeit rosa.

Phenolphthalein zeigt die rot – violette Färbung bei pH – Werten zwischen 8 und 13. In den Reagenzgläsern 2 und 3 werden die Triacylglycerine der Sahne durch die Lipase in Glycerin und

Fettsäuren gespalten. Durch die Entstehung der Fettsäuren wird die Natronlauge neutralisiert und die Entfärbung von Phenolphthalein zeigt diese pH – Wertveränderung an. Dieser Prozess wird durch die Anwesenheit von Cholsäure beschleunigt, denn Gallensäure ist ein hervorragender Emulgator. Die Tatsache, dass sich die rosa gefärbte Emulsion im vierten Reagenzglas nicht entfärbt, beweist, dass Orlistat die im Reagenzglas wirkende Lipasekonzentration wirkungsvoll hemmt. Somit findet keine Fetthydrolyse statt und die alkalische Lösung wird nicht neutralisiert.

#### **Eiweissmangel und Ödeme: Kontextaspekt 4**

Durch Eiweißmangel können Ödeme entstehen. Ödeme sind Flüssigkeitsansammlungen im Gewebe. Sie können aus unterschiedlichen Ursachen entstehen. Eine Ursache ist der Eiweißmangel im Blut. Der Eiweißmangel im Blut ist die Folge einer Fehlernährung, die bewusst gewollt ist oder durch Nahrungsmangel hervorgerufen wird. Ist das Bluteiweiß vermindert, wirkt sich der Mangel auf den osmotischen Druck aus, der in den Kapillaren auftritt. Bei vermindertem osmotischem Druck ist die Bilanz zwischen dem Flüssigkeitsaustritt aus den Kapillaren in das Gewebe und der entsprechenden Flüssigkeitsaufnahme aus dem Gewebe in das Blut gestört. Im Gewebe bleibt vermehrt Flüssigkeit zurück und das Gewebe schwillt an.

#### ***Die verzerrte Wahrnehmung bei Essstörungen***

In den westlichen Industrieländern steht Nahrung im Überfluss zur Verfügung, dennoch nimmt die Anzahl der Hungernden zu. Sie hungern, weil sie es wollen. Dürre, kantige Mannequins verkörpern ein Schönheitsideal, dem Frauen und junge Mädchen bereitwillig ihre Rundungen opfern möchten. Der Anfang einer langen Leidensgeschichte beginnt meistens mit einer Diät und endet häufig in einer Essstörung. Ein gestörtes Essverhalten ist nicht geschlechtsspezifisch. Unter Essstörungen leiden nicht nur Mädchen sondern immer mehr Jungen und junge Männer (Lakotta S. 208-212). Die jungen Männer und Frauen treiben exzessiv Sport und betonen, es gehe nur um Fitness. Um ihren Idolen nachzueifern, nehmen sie größte körperliche Anstrengungen auf sich.

Der Engländer Richard Morton hat als erster 1791 die Magersucht beschrieben. Morton lieferte eine genaue Beschreibung der Symptome: starkes Untergewicht verknüpft mit einer großen Angst vor Gewichtszunahme, Überaktivität und eine Verweigerungshaltung gegenüber Behandlungen. Fast zwei Jahrhunderte später prägte Sir William Gull den bis heute gängigen Fachbegriff für die Magersucht: *Anorexia nervosa*.

Die Erkrankung beginnt in der Regel in der Pubertät. Sie zeichnet sich in einer Störung des Essverhaltens aus, die zu einer deutlichen Gewichtsabnahme führt. Die Bezeichnung *Anorexia nervosa* legt nahe, dass es sich dabei um eine Appetitlosigkeit handelt, also das Hungergefühl vermindert ist. Für stark abgemagerte Kranke trifft das zu. In frühen Krankheitsstadien dagegen verspüren die Magersüchtigen verstärkt Hunger, doch der wird energisch bekämpft.

Die Zwiespältigkeit gegenüber dem Essen zeigt sich darin, dass die Kranken sich intensiv mit der Nahrungszubereitung beschäftigen, aber die Teilnahme am Essen verweigern. Angebotene Speisen werden zurückgewiesen. Heimlich verschlingen sie teilweise ungeheure Nahrungsmengen. Die bei solchen bulimischen Anfällen (*Bulimie* wörtlich: Ochsenhunger)<sup>14</sup> aufgenommenen Speisen werden anschließend erbrochen und damit dem Körper entzogen. Ist die Krankheit fortgeschritten, werden die bulimischen Phasen seltener.

Für die Magersucht ist eine verzerrte Wahrnehmung symptomatisch. Sie zeigt sich darin, dass die Erkrankten sich dick und unförmig fühlen, obwohl sie schon stark abgemagert sind. Nichts zu essen wird zum Lebensinhalt. Belohnt wird die Nahrungsverweigerung mit einem Körpergefühl, das trotz Abmagerung Leichtigkeit und Stärke signalisiert. Die Angst zu dick zu werden, treibt die Betroffenen dazu, Abführmittel und Appetitzügler einzunehmen.

Magersucht wird zu einer lebensgefährlichen Erkrankung, wenn die Kranken bereits bis zur Hälfte des Ausgangsgewichtes abgenommen haben. Ist der Body – Mass – Index 10 statt 20, der Körper also um die Hälfte seines Normalgewichtes reduziert, dann liegt eine akute Lebensgefahr vor. Anzeichen für akute Lebensgefahr bestehen dann, wenn die Nierenfunktion eingeschränkt ist, das Herz zu langsam schlägt und die Bauchspeicheldrüse extrem geschrumpft ist. Der Körper ist bis auf das Skelett abgemagert. Arme und Beine sind extrem dünn. Die Unterschenkel und Füße sind durch eine Vielzahl von Ödemen gekennzeichnet (Frankfurter Rundschau 2001 Nr.289 12. Dezember S. 22, Trechow 2001 S. 25, Wöckel & Schmidt 2002 S.365).

### ***Das Krankheitsbild von Kwashiorkor***

Weltweit hungern etwa 800 Millionen Menschen aus Nahrungsmangel. Wird zu wenig Eiweiß in der Nahrung zugeführt, ist der Eiweißaufbau gestört. Äußerlich sichtbar wird das durch ausgedünntes Haar, geringe Bein- und Armmuskulatur sowie im aufgedunsenen Bauch und in den Wasseransammlungen im Gewebe. Die Wasseransammlungen im Gewebe und im Bauchraum beruhen auf einer verminderten Bluteiweißkonzentration. Da das Bluteiweiß für den osmotischen Druck in den Gefäßen mitverantwortlich ist, bleibt in der Bilanz mehr Wasser im Gewebe zurück als bei einer normalen Ernährung. Kwashiorkor ist eine Proteinmangelkrankheit bei Kindern, die in allen Hungergebieten der Welt auftritt. Die Übersetzung des Namens bedeutet „Erste“ und „Zweite“. Die Krankheit befällt meistens dann das erstgeborene Kind, wenn ein zweites geboren wird, da das Zweitgeborene gestillt wird und das Erstgeborene oft nur noch mit dünnem Haferschleim versorgt werden kann.

Haar- und Hautveränderungen beim Kleinkind sowie gehäufte Infektions- und Durchfallerkrankungen sind ebenso Symptome und Folgen des Eiweißmangels wie der

---

<sup>14</sup> Die Bulimie kann nicht nur Bestandteil eines anorektischen Krankheitsverlaufes sein. Sie wird auch als eigenständige Krankheit beschrieben, von der normalgewichtige Jugendliche betroffen sind.

Hungerbauch mit der für ihn typischen Ansammlung von Wasser im Bauchraum (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb. 14: Hungerbäuche).

### ***Ödeme***

Im Blut sind die Bluteiweißmoleküle in einer Konzentration von 6,5 g/L bis 8,0 g/L vorhanden. Sie stammen zum überwiegenden Teil aus der Leber. Entsprechend ihrer Größe können die Serumproteine nicht durch die dünnen Wände der Kapillaren diffundieren. Wassermoleküle sind hingegen frei beweglich. Die Proteine sind osmotisch wirksame Teilchen. Jede Änderung der Konzentration der Plasmaproteine stört die Wasserverteilung zwischen Blut und den Flüssigkeiten zwischen und in den Gewebezellen. Normalerweise liegt die Konzentration der Proteine im Plasma zwischen 60g/L und 80 g/L. Albumin liegt mit seiner Konzentration von 39 g/L bis 55 g/L weit über der Konzentration aller anderer Proteine. Da unter den Plasmaproteinen Albumin den größten Anteil ausmacht, wirken sich Veränderungen seiner Konzentration besonders stark auf den osmotischen Druck aus.

Bei einer Mangelernährung ist der Normalwert des Gesamteiweißes im Blutserum stark unterschritten. Ist der Blutdruck größer als der osmotische Druck, diffundiert die Flüssigkeit aus dem Blut in das Gewebe. Ist der Blutdruck kleiner als der osmotische Druck, wird Wasser in den Adern aufgenommen. Der Blutdruck beträgt am arteriellen Ende der Kapillaren ca. 4 kPa und fällt zum venösen Ende auf 2 kPa ab. Zu Beginn der arteriellen Kapillaren beträgt die Druckdifferenz etwa 1,3 kPa. Hier findet die Flüssigkeitsabgabe ins Gewebe statt. Am venösen Ende der Kapillaren ist der osmotische Druck um 0,7 kPa größer als der Blutdruck (Silbernagl 1979 S. 144-145). Dort findet die Flüssigkeitsaufnahme ins Gewebe statt.

Wird der Eiweißgehalt im Serum reduziert, ist der Rückfluss ins Blut vermindert. Als Folge resultiert – je nach Proteinmangel – eine mehr oder weniger starke Wasseransammlung im Gewebe oder in der Bauchhöhle. Wenn es sich um Flüssigkeitsansammlungen im Bauchraum handelt, die die Bauchhöhle ausdehnen, spricht man von einer Aszites (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb. 10: Flüssigkeitsaustausch an Kapillaren; Abb. 13: Ödembildung).

### ***Experimentelle Untersuchung***

***Versuch 1: Die quantitative Bestimmung des Proteingehalts einer Probe, deren Massenkonzentration der des Serumproteingehalts eines Hungernden entspricht.***

#### **Messprinzip**

Der Proteingehalt im Serum wird im Labor durch die Biuretmethode bestimmt. Das Verfahren beruht auf der Anlagerung von zweiwertigen Kupferionen im alkalischen Milieu an die

Peptidbindung der Proteine. Im sogenannten Biuretreagenz<sup>15</sup> werden die Kupferionen durch Tartratkomplexe in Lösung gehalten. Die Intensität der entstehenden, violetten Farbe ist der Zahl der Peptidbindungen und damit der Proteinkonzentration in einem weiten Bereich proportional. Das Extinktionsmaximum liegt bei 540 nm. Die Berechnung erfolgt über einen Faktor, der durch die Analyse von Serumalbumin als Standardsubstanz ermittelt wird.

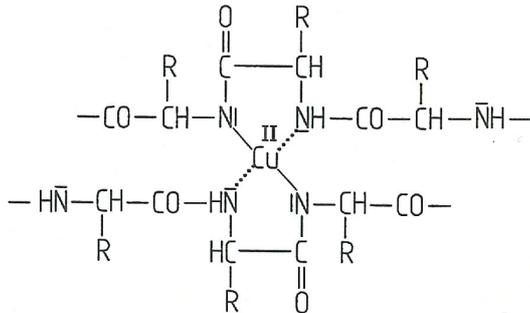


Abbildung 11: Biuret – Reaktion (Baumann et al. 2000 S. 13)

### Geräte und Chemikalien

Spektralphotometer Novaspec®, Küvetten, Messpipetten, 0,9%ige Kochsalzlösung, 1%ige Albuminlösung, Biuret – Reagenz (Merck).

### Herstellung einer 0,9%igen Kochsalzlösung und einer 1%igen Albuminlösung

0,9 g Kochsalz werden in 99,1 mL Wasser gelöst.

1g getrocknetes Rinderalbumin wird abgewogen, in 30 mL 0,9%iger Kochsalzlösung gegeben und unter leichtem Schwenken gelöst. Die Lösung wird auf 100 mL so aufgefüllt, dass keine Schaumbildung entsteht.

### Durchführung

Die Albuminlösung wird auf ca. 80°C auf einer Heizplatte erhitzt, danach auf 40°C abgekühlt und in einem Zeitraum von etwa 20 Minuten weiterhin auf 40°C gehalten. Die Reagenzgläser werden nach vorgegebenem Pipettierschema gefüllt und bei Raumtemperatur 30 Minuten stehen gelassen. Die Farbreaktion ist zeitabhängig. Nach 30 Minuten erfolgen die Messungen.

Tabelle 16: Pipettierschema zur quantitativen Eiweißbestimmung

Reagenzglas – Nr.	1	2	3	4	5
Albuminlösung in mL	0	0,1	0,5	0,8	1
Wasser in mL	1	0,9	0,5	0,2	0
Biuret-Reagenz in mL	4	4	4	4	4

Tabelle 17: Messprotokoll und Auswertungsschema

	1. Messung	2. Messung
--	------------	------------

<sup>15</sup> Die Bezeichnung Biuret bezieht sich auf das Kondensationsprodukt, welches bei vorsichtigem Erhitzen von Harnstoff entsteht.  $2 \text{ NH}_2\text{CONH}_2 \rightarrow \text{NH}(\text{H}_2\text{NCO})_2 + \text{NH}_3$  (NiU – Chemie 5 1994 S. 49).

Reagenzglas – Nr.	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
E <sub>540</sub>	0,025	0,071	0,276	0,366	0,471						
ΔE <sub>540</sub>	0	0,046	0,251	0,341	0,446		0	0,057	0,254	0,391	0,418
mg Protein pro Testansatz	0	1	5	8	10		0	1	5	8	10
mg Protein pro L	0	200	1000	1600	2000		0	200	1000	1600	2000
g Protein pro L	0	0,2	1	1,6	2		0	0,2	1	1,6	2

### Ergebnis

Die Auftragung der Messwerte ergibt eine Gerade, die durch den Ursprung verläuft. Die Extinktion ist proportional zur Albuminmasse in einem Liter Lösung. Damit wird das Lambert – Beersche Gesetz bestätigt. Die Steigung der Geraden entspricht dem Produkt aus der Küvettenschichtdicke und dem molaren Extinktionskoeffizienten.

$$E = \varepsilon \cdot d \cdot c$$

Hierbei bedeuten:	E	Extinktion
	$\varepsilon$	spezifischer molarer Extinktionskoeffizient, gemessen in $\frac{cm^2}{mol}$
	c	Konzentration, gemessen in $\frac{mol}{cm^3}$
	d	Schichtdicke der Küvette, gemessen in cm

Die Masse des Proteins in einer unbekannt Probe, die 1: 10 verdünnt wurde, und von einem Magersüchtigen stammen könnte, lässt sich mit Hilfe der Eichkurve quantitativ bestimmen. Die Masse beträgt 25 g/L.

### ***Versuch 2: Eine Simulation des Flüssigkeitsrückflusses aus den Gewebezweischenräumen in die Adern (Bracht 1999 S. 53)***

#### Geräte und Chemikalien

Ei, Kristallisierschale, Aqua dest., Salzlösung, Essigsäure (R 10-34 S (1/2)-23-26-45).

#### Durchführung

Von einem rohen Ei wird mit Essigsäure vorsichtig die Kalkschale gelöst. Spülen Sie das Ei vorsichtig mit Wasser ab, wiegen Sie das Ei und messen Sie die Länge. Das vorpräparierte Ei wird in Aqua dest. gelegt. Wiederholen Sie den Versuch und tauschen Sie Aqua dest durch eine konz. Salzlösung aus. Stechen Sie nach einem Tag mit einer Stecknadel je ein feines Loch in die Eier.

#### Beobachtung

In Aqua dest. schwillt das Ei an, was nach einigen Stunden deutlich sichtbar ist, und platzt. In Salzwasser schrumpft das Ei.

#### Ergebnis:

Im Ei befinden sich als osmotisch wirksame Teilchen Salze und Proteine. Die Eimembran ist nur für Wassermoleküle permeabel. Befindet sich das Ei im Wasser, diffundieren bevorzugt

Wassermoleküle in das Ei. Das Ei schwillt an. Die Geschwindigkeit der Nettobewegung hängt von der Größe des Konzentrationsunterschiedes ab. Je kleiner der Konzentrationsunterschied wird, desto geringer ist die Geschwindigkeit des Nettoflusses. Die Eimembran hält nur einen bestimmten Druck aus und zerplatzt, wenn der Druck, der durch die osmotisch wirksamen Teilchen ausgelöst wird, zu hoch ist. Liegt das präparierte Ei im Salzwasser, drehen sich die Verhältnisse um. Wassermoleküle diffundieren in der Bilanz verstärkt ins Salzwasser. Das Ei schrumpft.

Unter natürlichen Bedingungen diffundieren Wassermoleküle freiwillig ohne Energieverbrauch aus den Gewebezwischenräumen in den venösen Teil der Kapillaren zurück. Sind viele voneinander unabhängige Teilchen in Bewegung, so haben sie in ihrer Gesamtheit die Tendenz, in einen Zustand überzugehen, in dem eine möglichst große Gleichverteilung vorliegt. Nicht weil eine geheime Kraft sie dahin zieht, sondern weil die Gleichverteilung der wahrscheinlichste Zustand ist, also durch eine Entropiezunahme messbar ist.

Je größer der Konzentrationsunterschied ist, desto größer ist auch der Nettofluss in die Adern und damit auch die Diffusionsgeschwindigkeit. Nicht simuliert wird im Experiment der Zusammenhang zwischen Blutdruck, osmotischem Druck und Diffusionsgeschwindigkeit bzw. Diffusionsrichtung.

#### ***Ein Gedankenexperiment:***

***Die Gleichverteilung der Teilchen als wahrscheinlichster Zustand ist als Entropiezunahme messbar (Matschke 1978 S. 142 – 144).***

Ein Behälter ist durch eine Glaswand in zwei gleiche Räume aufgeteilt. In dem einen Volumen befindet sich Vakuum und in dem anderen ein Gas mit einer kleinen Stahlkugel. Schüttelt man den Behälter stark, zerschlägt die Stahlkugel die trennende Glaswand und das Gas strömt spontan aus, bis es sich gleichmäßig auf das gesamte Volumen  $V_{\text{links}} + V_{\text{rechts}}$  ausgedehnt hat. Es ist davon auszugehen, dass die Reaktionsenthalpie gleich Null ist; dennoch läuft die Reaktion freiwillig ab.

***Statistische Überlegungen, die eine Erklärung für die Gleichverteilung der Teilchen liefern.***

#### **Annahme:**

Es liegen drei Gasteilchen vor mit den Nummern 1, 2, 3. Es ergeben sich vier Konfigurationen für die Verteilung in den beiden Volumina:

1. In  $V_{\text{links}}$  0 Teilchen, in  $V_{\text{rechts}}$  3 Teilchen
2. In  $V_{\text{links}}$  1 Teilchen, in  $V_{\text{rechts}}$  2 Teilchen
3. In  $V_{\text{links}}$  2 Teilchen, in  $V_{\text{rechts}}$  1 Teilchen
4. In  $V_{\text{links}}$  3 Teilchen, in  $V_{\text{rechts}}$  0 Teilchen.

Die vier Konfigurationen sind allerdings nicht gleich wahrscheinlich. Die Konfigurationen 2 und 3 können jeweils durch drei verschiedene Anordnungsmöglichkeiten beschrieben werden.

Teilchen 1 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 2 und 3 in  $V_{\text{rechts}}$   
Teilchen 2 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 1 und 3 in  $V_{\text{rechts}}$   
Teilchen 3 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 1 und 2 in  $V_{\text{rechts}}$

Teilchen 2 und 3 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 1 in  $V_{\text{rechts}}$   
 Teilchen 1 und 3 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 2 in  $V_{\text{rechts}}$   
 Teilchen 1 und 2 in  $V_{\text{links}}$  und Teilchen 3 in  $V_{\text{rechts}}$

Ergebnis:

Da alle Anordnungsmöglichkeiten gleich wahrscheinlich sind, ist die Konfiguration am wahrscheinlichsten, die durch gleiche bzw. nahezu gleiche Mikrozustände beschrieben wird. Eine Vergrößerung der Teilchenanzahl zeigt, dass die Konfigurationen am wahrscheinlichsten sind, bei denen die Teilchen ganz oder fast gleichmäßig auf die Volumina verteilt sind. Die Gesetzmäßigkeit ist am Pascalschen Dreieck ablesbar.

Die Entropie als messbare Größe

Die Entropie ist eine Größe, die ein beliebiges System ebenso charakterisiert wie die Größen Volumen, Druck, Energie, Konzentration, Masse usw. Damit muss der Entropie  $S$  eines Systems auch ein Wert mit einer charakteristischen Einheit zugeordnet werden können.

Die Entropie ist eine additive Größe, d.h. die Entropie des Systems A lässt sich zur Entropie des Systems B addieren. Die Wahrscheinlichkeiten hingegen verhalten sich nicht additiv sondern multiplikativ. Die Wahrscheinlichkeit mit einem Würfel eine Sechs zu würfeln beträgt  $1/6$  (Zahl der günstigen Fälle bezogen auf die Zahl der möglichen Fälle). Mit zwei Würfeln eine Sechs zu würfeln ist viel unwahrscheinlicher:  $1/6 \cdot 1/6 = (1/6)^2$ .

*Daraus folgt:*

1.  $S = f(W)$
2.  $S = S_1 + S_2 = f(W_1) + f(W_2)$
3.  $W = W_1 \cdot W_2$
4.  $S = f(W_1 \cdot W_2) = f(W_1) + f(W_2)$

Gleichung 4 wird durch folgenden Ansatz gelöst:

5.  $S = k \ln W$       **(Boltzmann Beziehung)**

Der Wert der Boltzmann Konstante  $k$  beträgt:

6.  $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

Geht man von  $6 \cdot 10^{23}$  Gasteilchen aus, die sich von einem Anfangsvolumen  $V_1$  auf das Endvolumen  $V_2 = 2 V_1$  ausdehnen, dann folgt daraus für die Entropie  $S$  des Systems vor der Ausdehnung:

7.  $S_1 = k \cdot \ln W_1$

Für die Entropie nach der Zustandsänderung gilt:

8.  $S_2 = k \cdot \ln W_2$

Die Entropieänderung durch den Prozess ergibt sich wie folgt:

9.  $\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln W_2 - k \cdot \ln W_1 = k \cdot \ln \frac{W_2}{W_1}$

Die Wahrscheinlichkeit ein Gasteilchen im Gesamtvolumen  $V_2$  zu finden ist  $1$ , es in  $V_1$  vorzufinden  $\frac{1}{2}$ .

Für ein Teilchen gilt:

$$10. \quad \frac{W_2}{W_1} = \frac{V_2}{V_1} = 2$$

Für  $6 \cdot 10^{23}$  Teilchen gelten:

$$11. \quad \frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{6 \cdot 10^{23}} = 2^{6 \cdot 10^{23}}$$

Damit wird

$$12. \quad \Delta S = k \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot \ln 2$$

$$13. \quad \Delta S = 1,38 \cdot 10^{23} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 0,693 \frac{J}{K \cdot mol}$$

$$14. \quad \Delta S = 5,7 \frac{J}{K \cdot mol}$$

*Das bedeutet:*

Der Zustand der Gleichverteilung ist der wahrscheinlicherer Zustand. Die Entropie nimmt vom Anfangs- zum Endzustand um  $5,7 \frac{J}{K \cdot mol}$  zu (Matschke 1975 S. 142 – 144).

### **Eiweißaufnahme und Harnstoffabgabe: Kontextaspekt 5**

Wer von den Männern möchte nicht einen Körper besitzen, der die Aufmerksamkeit von Frauen auf sich zieht, einen Körper, der durchtrainiert und muskulös ist, der neidvoll bewundert wird? Hartes, kontinuierliches Training macht es möglich, die Muskulatur zu kräftigen und das ‚Outfit‘ der Muskeln zu beeinflussen. Kombiniert mit einem speziellen Training können die Körperausmaße verändert werden. Muskulöse Oberarme, so dick wie Unterschenkel und ein breiter Rücken, hinter dem sich zwei normalgewichtige Menschen verstecken können, das könnte der Traum eines Bodybuilders sein, für dessen Verwirklichung er sich Woche um Woche quält. Damit einher geht in der Regel ein Eiweißzuwachs an gezielten Stellen. Das weniger ansehnliche Fett nimmt ab. Nicht immer scheint das Training ausreichend zu sein, um so schnell wie möglich die gewünschten Proportionen zu erreichen.

Ein ganzes Arsenal an Pulvern, Riegeln, Ampullen und Tabletten werden von Herstellern angeboten. Eiweißpulver wie Protizym®, Mega – Body – Builder®, Fit - Protein® sind als zusätzliche Sportlerernährung im Angebot und gelten nach Herstelleraussagen als unverzichtbar für den angestrebten Muskelzuwachs. Mindestens 2,5 Gramm Eiweiß pro Kilo Körpergewicht sollten Leistungssportler pro Tag essen. Ein 80 Kilo schwerer Bodybuilder müsste dann 200 g Eiweiß am Tag essen. Geht man davon aus, dass ein Rindersteak aus 20 Prozent Eiweiß besteht (Belitz et al. 2001 S. 537), wäre das für den Bodybilder jeden Tag eine Portion von einem Kilo Fleisch.

Im Gegensatz dazu ist die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) und deren Arbeitskreis für Sporternährung der Meinung, dass auch Bodybuilder schon mit der Eiweißzufuhr in der täglichen

Nahrung auskämen. Vorgerechnet wird, dass Kraftsportler nur einen Mehrbedarf an Eiweiß von etwa 0,03 Gramm pro Körpergewicht und Tag haben (Brian 2000 S. 93-96).

### ***Die Proteinbilanz im menschlichen Körper***

Das Muskelgewebe wird ständig durch Abbau und Umbau erneuert. Die frei werdenden Baustoffe reichen nicht aus für den vollständigen Ersatz. Daher muss Eiweiß durch die Nahrung aufgenommen werden. Für eine optimale Versorgung des Körpers wird eine tägliche Zufuhr von 0,8 g Eiweiß pro kg Körpergewicht von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung empfohlen. Bei alten Leuten, Kindern und Kranken ist der Richtwert für den Eiweißbedarf höher. Der Richtwert beträgt 1,2 –1,5g/kg Körpergewicht, bei kranken Menschen sogar bis zu 2g/kg Körpergewicht täglich (Schmidt et al. 2000 S. 797). Für ein Körpergewicht von 80 Kilogramm bedeutet das für einen gesunden Menschen eine Eiweißzufuhr von 64 Gramm Protein pro Tag. Rechnet man den empfohlenen Eiweißmehrbedarf von 0,03 Gramm pro Kilo Körpergewicht und Tag bei einem Kraftsportler hinzu, bedeutet das, dass 66,4 Gramm Eiweiß pro Tag aufgenommen werden sollten, um einen Muskelzuwachs zu begünstigen. Das entspricht einer Rindersteakmasse von 332 g. Eier haben einen Eiweißanteil von durchschnittlich 12 %. Um 66,4 Gramm Eiweiß aus Eiklar aufzunehmen, müssen 553,33 g Eier gegessen werden. Das Durchschnittsgewicht eines Hühnereis beträgt 58g (Belitz et al. 2001 S. 537). Es müssten mindestens neun Eier gegessen werden, um den Eiweißbedarf aus Eiklar zu decken.

Der tägliche Proteinumsatz des Menschen wird bei ca. 200 g pro Tag angegeben (Löffler et al. 2000 S.251). Der Harnstoff, der im Urin ausgeschieden wird, entspricht einer Proteinmasse von mindestens 32 g pro Tag. Damit wird der tägliche Proteinumsatz wesentlich höher eingeschätzt als ein Rückschluss aus der ausgeschiedenen Harnmenge es zulässt. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass neben der Synthese der Proteine, die zur Aufrechterhaltung einer positiven Eiweißbilanz ersetzt werden müssen, auch Vorgänge ablaufen, bei denen Aminosäuren bereitgestellt werden, die einerseits zum Umbau von Proteinen dienen, andererseits aber auch bei der Synthese anderer Verbindungen beteiligt sind. Die beim Abbau der Aminosäuren entstehenden Ammoniumionen werden im menschlichen Organismus in Form von Harnstoff ausgeschieden.

### ***Der Normbereich der Harnstoffmenge***

Der Normbereich der Harnstoffmenge ist von der Proteinzufuhr abhängig. Je größer die tägliche Proteinzufuhr ist, desto größer ist auch die ausgeschiedene Harnstoffmenge. Proteine können nicht gespeichert werden, sondern müssen je nach Bedarf ab- oder umgebaut werden.

**Tabelle 18: Proteinzufuhr und Harnstoffausscheidung im Vergleich (Rick 1989 S. 246)**

<b>Proteinzufuhr pro Tag</b> in g /kg Körpergewicht	<b>Harnstoff pro Tag</b> in mg pro 100 mL Serum
--	--

0,5	13-26
1,5	24-51
2,5	30-60

### ***Die Harnstoffbildung im Körper***

Das Reaktionsschema der Harnstoffsynthese, das die Stöchiometrie der Reaktion wiedergibt, lautet:



Eines der Stickstoffatome des im Zyklus synthetisierten Harnstoffs stammt aus dem Aspartat, dem Salz der Aminosäure Asparagin. Das Kohlenstoffatom und das zweite Stickstoffatom des Harnstoffs stammen aus dem Kohlenstoffdioxid bzw. aus dem Ammoniumion.

Die Harnstoffsynthese in der Leber ist der wichtigste Weg zur Entsorgung von Ammoniumionen und von Ammoniak. Wird einer der Schritte in der Harnstoffsynthese blockiert, kommt es zu einem erhöhten Ammoniumspiegel im Blut mit weitreichenden Konsequenzen, da es keinen alternativen Stoffwechselweg für die Harnstoffsynthese gibt. Die molekulare Grundlage der Toxizität für Ammoniak und Ammoniumionen ist noch nicht völlig geklärt (Stryer 1996 S. 671, Lehninger et. al. 1998 S. 598-599).

### ***Experimentelle Untersuchung***

*Die quantitative Harnstoffbestimmung in einem Testserum und der Rückschluss auf die zugeführte Proteinmenge*<sup>16</sup>

#### Messprinzip: Der gekoppelte optische Test

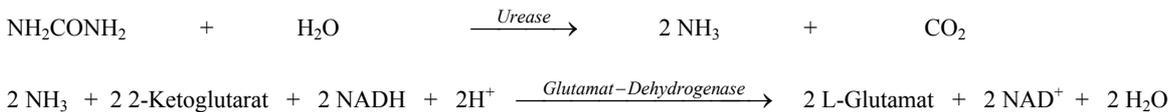
Harnstoff wird durch Urease in Ammoniak und Kohlenstoffdioxid gespalten. Die entstehenden Ammoniumionen reagieren mit  $\alpha$ -Ketoglutarat und NADH zu Glutamat,  $\text{NAD}^+$  und Wasser. Die Reaktion wird beschleunigt durch die Glutamat – Dehydrogenase<sup>17</sup>.  $\text{NADH}/\text{H}^+$  ist das Coenzym. Das Coenzym ist an der katalysierten Reaktion beteiligt. Es bindet zusammen mit dem Substrat an die Dehydrogenase und gibt in der Reaktion als beladener Wasserstoffüberträger Protonen und Elektronen ab. Die beschriebene Reaktion benutzt man als optischen Test. NADH absorbiert im UV – Bereich bei einer Wellenlänge von 340 nm.  $\text{NAD}^+$  weist bei dieser Wellenlänge keine Absorption auf. Je mehr Glutamat entsteht, desto geringer ist die Konzentration von NADH und desto kleiner ist der Wert der Extinktion (vgl. Anhang Abbildungen S. 3 Abb. 11: Absorption von NADH bzw.  $\text{NAD}^+$ ).

Ist eine Reaktion nicht vom Coenzym  $\text{NAD}^+/\text{NADH}+\text{H}^+$  abhängig, kann dennoch die Konzentration eines Stoffpartners bestimmt werden, wenn das Produkt der Reaktion gleichzeitig das Edukt

<sup>16</sup> Die Versuche wurden mit Unterstützung von Frau Dr. Gottschalk, Universitätsklinikum Göttingen, durchgeführt.

<sup>17</sup> Unter natürlichen Bedingungen ist die höchste Aktivität der Glutamatdehydrogenase in der Leber. Die Reaktion freier Ammoniumionen mit  $\alpha$ -Ketoglutarat zu Glutamat und Wasser unter Verbrauch von NADH ist ein Selbstschutz des menschlichen Körpers.

der optischen Testreaktion ist. Die Konzentration des Harnstoffs lässt sich mit dem beschriebenen gekoppelten Testverfahren bestimmen. Harnstoff und Wasser werden zu Kohlenstoffdioxid und Ammoniak mit Hilfe von Urease umgesetzt. Die gebildeten Ammoniumionen reagieren anschließend mit  $\alpha$ -Ketoglutarat und NADH und  $H^+$  zu Glutamat. Weitere Produkte sind Wasser und  $NAD^+$ , vorausgesetzt Glutamatdehydrogenase liegt vor. In der optischen Testreaktion wird nur so viel mol NADH umgesetzt wie Harnstoff vorhanden war.



(Rick 1990 S. 245)

### Testprinzip

Die zu untersuchende Harnstoffprobe wird mit der Testlösung R1 versetzt. R1 enthält eine Pufferlösung und NADH.

Danach wird R2 zugegeben und damit die Reaktion gestartet. Die Testlösung R2 enthält ebenso eine Pufferlösung, zusätzlich aber die Enzyme Urease und Glutamatdehydrogenase und das Substrat  $\alpha$ -Ketoglutarat.

Das Cosubstrat NADH hat ein Absorptionsmaximum bei 340 nm. Geht man davon aus, dass nach 5 Minuten die Urease alle Harnstoffmoleküle vollständig umgesetzt hat, dann ist die Differenz der Extinktion zum Zeitpunkt  $t = 0$  und der Extinktion zum Zeitpunkt  $t = 5$  min der Harnstoffkonzentration der Probe proportional. Ist der molare Extinktionskoeffizient für NADH bei 365 nm bekannt, so lässt sich nach dem Lambert – Beer – Gesetz die Konzentration der Harnstoffprobe bestimmen. Der molare Extinktionskoeffizient besitzt für einen bestimmten Stoff bei definierter Wellenlänge einen charakteristischen Wert. Der Wert gibt die Extinktion wieder, die durch eine einmolare Lösung dieses Stoffes bei einer Schichtdicke von 1 cm bewirkt wird.

### Geräte und Chemikalien

R1<sup>18</sup>: CAPSO<sup>19</sup>-Puffer: 5mmol/L, pH = 9,65; NADH  $\geq 0,23$  mmol/L (Hefe); Konservierungsmittel,

$V_{R1}$ : 500  $\mu$ L = 0,5 mL,

R2<sup>20</sup>: BICIN<sup>21</sup>-Puffer; 1000 mmol/L, pH = 7,6; Urease  $\geq 7,2$  U/mL (Schwertbohne); dextranversetzte Glutamatdehydrogenase  $\geq 0,9$  U/mL (Rinderleber);  $\alpha$ -Ketoglutarat  $\geq 8,3$  mmol/L; Konservierungsmittel,

$V_{R2}$ : 200  $\mu$ L = 0,2 mL,

$V_{\text{Probe}}$ : 20  $\mu$ L = 0,02 mL,

<sup>18</sup> Angaben für R1 und R2 finden sich auf dem Beipackzettel des kinetischen Harnstoff UV –Testes von UREA/BUN

<sup>19</sup> CAPSO: 3-(Cyclohexylamino)-2-hydroxy-1-propansulfonsäure

<sup>20</sup> Angaben für R1 und R2 finden sich auf dem Beipackzettel des kinetischen Harnstoff UV –Testes von UREA/BUN

<sup>21</sup> N,N-Bis(2-hydroxyethyl)-glycin

UV – Spektralphotometer Shimadzu®, Küvetten, 200 µL – Eppendorfpipette, 500 µL – Eppendorfpipette<sup>22</sup>.

### Versuchsdurchführung

Auf den Boden einer Küvette werden zunächst 0,02 mL der ausgestellten Probe gegeben und danach 0,5 mL der Testlösung R1 hinzugefügt. Die Extinktion E1 wird bei 365 nm gemessen. Die Reaktion beginnt, wenn 0,2 mL der Testlösung R2 hinzugefügt werden. Nach 5 Minuten wird erneut die Extinktion E2 gemessen.

### Ergebnis

E1 beträgt 0,577 und E2 beträgt 0,05. Die Extinktionsänderung  $\Delta E$  ist daher 0,527. Die Extinktionsänderung  $\Delta E$  ist proportional zur Konzentrationsänderung von NADH und damit auch proportional zur Konzentrationsänderung von Harnstoff. Ist nach 5 Minuten der Harnstoff vollständig umgesetzt, dann ergibt sich aus der Extinktionsdifferenz die Konzentration des in der Probe ursprünglich vorhandenen Harnstoffs.

### Die Ermittlung von c

$$c = \frac{\Delta E}{\epsilon \cdot d}$$

$$c = \frac{\Delta E \cdot \text{mmol} \cdot \text{cm}}{3,4 \cdot \text{L} \cdot 1 \cdot \text{cm}}; \quad d = 1 \text{ cm}$$

### Zur Einheit von $\epsilon$

$E = \epsilon \cdot c \cdot d \Leftrightarrow \epsilon = \frac{E}{c \cdot d}$ ; geht man davon aus, dass die Größen E, c und d den Wert 1 haben, dann

ergibt sich für die Einheit von  $\epsilon$  ( $\mu\text{mol}$ ):  $\frac{\text{cm}^3}{\mu\text{mol} \cdot \text{cm}}$  oder  $\frac{1000 \cdot \text{cm}^3}{\text{mmol} \cdot \text{cm}} = \frac{\text{L}}{\text{mmol} \cdot \text{cm}}$

Der Wert für  $\epsilon_{365 \text{ nmNADH}}$  beträgt  $3,4 \frac{\text{L}}{\text{mmol} \cdot \text{cm}}$ .

### Die Konzentration von Harnstoff mit Berücksichtigung von Gesamtvolumen und Probenvolumen

(Rick 1989 S .212 – 213)

- Das Gesamtvolumen beträgt 0,72 mL ( $V_{R1} = 0,5 \text{ mL} + V_{R2} = 0,2 \text{ mL} + V_{(\text{Probe})} = 0,02 \text{ mL}$ ).
- Das Volumen der Probe beträgt 0,02 mL.
- Der Verdünnungsfaktor beträgt im gegebenen Fall 2.
- Die Berechnung der Probenkonzentration erfolgt nach der Formel:

$$c(\text{NADH}) = \frac{\Delta E \cdot \text{mmol} \cdot V_{\text{gesamt}}}{3,4 \cdot \text{L} \cdot 1 \cdot V_{\text{Probe}}} = 5,58 \text{ mmol/L.}$$

$$c(\text{NADH}) = c(\text{NAD}^+) = c(\text{NH}_4^+) = 2 \cdot c(\text{Harnstoff})$$

<sup>22</sup> Die nötigen Chemikalien wurden dankenswerter Weise vom zentralen Blutlabor des Klinikums Göttingen zur Verfügung gestellt.

$c(\text{Harnstoff}) = 2,79 \text{ mmol/L}$ , also  $0,00279 \text{ mol/L}$ . In 20 mL sind entsprechend  $55,8 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$ , also  $3,348 \cdot 10^{-3} \text{ g}$  Harnstoff enthalten. In 100 mL sind das 0,01674 g. Verrechnet man den Verdünnungsfaktor von 2, heißt das, dass die Harnstoffkonzentration 33,48 mg in 100 mL Testserum beträgt. D.h. es müssten ca. 2,5 g Protein pro kg Körpergewicht zugeführt worden sein (vgl. Tabelle 18 S.108). Nimmt man an, dass die Testperson 80 kg wiegt, bedeutet das eine Zufuhr von 200g Protein. Wenn 20 Prozent von Rindfleisch Proteine sind, heißt das wiederum eine Zufuhr von 1 kg Fleisch, also von mindestens 5 Steaks.

## **Antioxidanzien – Nahrungsergänzungen oder Ernährungsirrtümer?: Kontextaspekt 6**

### ***Sauerstoffradikale***

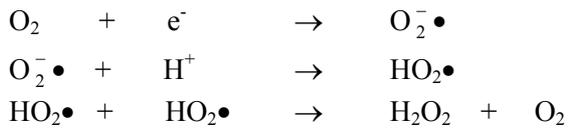
Folgt man der gängigen Werbung, so schädigen freie Radikale die Erbsubstanz, fördern das Altern und den Krebs und beeinträchtigen das Immunsystem. Radikale sind Teilchen, die mindestens ein ungepaartes Elektron besitzen. Als besonders gefährlich werden Sauerstoffradikale eingeschätzt, die bei Redoxreaktionen entstehen können. Zwei Beispiele für Sauerstoffradikale sind die Hydroxyl – und Perhydroxyl – Radikale. Sie existieren kurzfristig, wenn ein Gemisch von Sauerstoff und Wasserstoff mit einem Funken gezündet wird.

In den menschlichen Zellen gibt es spezielle Räume, wo Sauerstoffradikale entstehen und in lebenswichtige Prozesse eingebunden sind. Eine der Organellenarten sind die Mitochondrien. Dort können die Sauerstoffradikale beim Elektronentransport über die Atmungskette entstehen. In der Atmungskette wird in der Bilanz Sauerstoff zu Wasser reduziert. Dies geschieht durch eine schrittweise Übertragung von Elektronen und Protonen. Dabei können Sauerstoffradikale entweichen. Es handelt sich dabei um reaktive Sauerstoffverbindungen, die einen beachtlichen Energiebetrag bereitstellen, wenn sie als Elektronenakzeptor fungieren und erneut Elektronen aufnehmen.

Eines der Nebenprodukte ist das Superoxidradikal  $O_2^- \bullet$ , das nicht nur selbst hochreaktiv ist, sondern auch mit Wasserstoff in Wasserstoffperoxid überführt werden kann, aus dem dann wiederum das aggressive Hydroxylradikal wird (vgl. Anhang Abbildungen S. 4 Abb. 12: Bildung freier Radikale in den Mitochondrien; Abb. 15: Bildung freier Radikale an der Mitochondrieninnenmembran).

Eine zweite Organellenart, in denen Sauerstoffradikale entstehen können, sind die Peroxisomen, die besonders gehäuft in Leberzellen auftreten. Dort findet die Oxidation von Fettsäuren statt. Es handelt sich um einen Molekülabbau, bei dem jede Fettsäure mehrfach hintereinander um zwei Kohlenstoffeinheiten unter Elektronenabgabe verkürzt wird. Die Abspaltung der beiden Kohlenstoffeinheiten erfolgt in verschiedenen Teilschritten, die enzymatisch gesteuert sind. Im ersten Schritt werden von der Fettsäure direkt Elektronen an elementaren Sauerstoff abgegeben, so dass reaktive Sauerstoffradikale entstehen, die dann mit Protonen letztlich zu Wasserstoffperoxid reagieren.

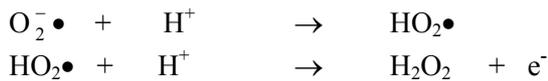
Bei der Übertragung der Protonen und Elektronen sind folgende Teilschritte plausibel: Wenn ein Sauerstoffmolekül ein Elektron aufnimmt, entsteht das Superoxidanion. Dieses wird entweder protoniert und damit zum Perhydroxyl, das im weiteren Reaktionsverlauf spontan zu Wasserstoffperoxid reagiert. Oder die Superoxidanionen reagieren direkt miteinander und bilden mit Protonen Wasserstoffperoxid.



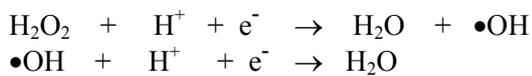
oder



oder



Auch Wasserstoffperoxid ist ein Radikalbildner, wenn es als Elektronenakzeptor fungiert.



(Weindruch 1996 S.76)

$\text{O}_2^- \bullet$ : Superoxidation

$\text{HO}_2 \bullet$ : Perhydroxyl

Die reaktiven Sauerstoffradikale, die beim Fettsäureabbau und in der Atmungskette entstehen, können in der Regel nicht unkontrolliert anderen Stoffen Elektronen entreißen. Vielmehr wird die Elektronenübergabe gezielt durch Enzyme und Coenzyme geleitet. Coenzyme übernehmen die Protonen und Elektronen und stellen sie Sauerstoffmolekülen zur Verfügung, die sie aufnehmen. Sie reagieren vermutlich in schnellen, aufeinanderfolgenden Teilschritten gezielt zu Wasserstoffperoxid, ohne dass die reaktiven Sauerstoffradikale, die als Zwischenprodukte auftreten, zusätzlich Elektronen aufnehmen.

### ***Nicht – enzymatische Radikalfänger***

Der menschliche Organismus hat eine ganze Reihe von Abwehrmechanismen gegen die gefährlichen Sauerstoffradikale entwickelt. Unterschieden wird zwischen enzymatischer und nicht enzymatischer Abwehr. Bei beiden wird Sauerstoff durch ein Antioxidanz abgefangen, das selbst oxidiert wird. Zu den nicht enzymatischen Radikalfängern gehören das wasserlösliche Vitamin C sowie die fettlöslichen Vitamine A und E.

Die Lebensmittelindustrie nutzt seit Jahrzehnten bewährte Zusatzstoffe, die die Haltbarkeit von Lebensmitteln verlängern, sie zum Beispiel vor dem Ranzigwerden, vor Farbverlusten oder Geschmacksveränderungen schützen. Diese Zusatzstoffe sind Radikalfänger, d.h. sie reagieren schneller mit Radikalen als die Lebensmittelinhaltsstoffe. Dabei werden die Radikalfänger selbst zum Radikal. Deshalb wirken Antioxidanzien nur bei geringen Konzentrationen. In höheren Dosen schlägt ihre Wirkung ins Gegenteil um. Sie fördern geradezu die Radikalbildung und

beschleunigen die Schädigungen. Unter welchen Bedingungen ein optimales Milieu geschaffen ist, in dem ein Gleichgewicht zwischen pro- und antioxidativ wirkenden Substanzen herrscht, darüber können auch heute noch keine wissenschaftlich haltbaren Aussagen getroffen werden.

### ***Enzymatische Radikalfänger***

Wasserstoffperoxid ist ein Zellgift, das beim Abbauprozess der Fettsäuren als Nebenprodukt entsteht. Die Peroxisomen sind die Reaktionsräume, in denen in der Leberzelle durch den Fettsäureabbau besonders viel Wasserstoffperoxid freigesetzt wird, vor allem bei der Reduktion von molekularem Sauerstoff.

Die Zellen besitzen ein ausgeklügeltes Abwehrsystem zur Zerstörung dieser reaktiven Spezies, an dem die Katalase beteiligt ist. Die Katalase gehört zu den Radikalfängerenzymen, die mit hoher Professionalität die Entgiftung der Zellen einleiten. Sie befindet sich in hoher Konzentration in den Peroxisomen, also den Reaktionsräumen, in denen vermehrt Wasserstoffperoxid gebildet wird. Sie beschleunigt die Zerlegung von Wasserstoffperoxid in Sauerstoff und Wasser.



Die Katalase besitzt ein an das Protein kovalent gebundenes Coenzym. Es handelt sich dabei um vier Hämingruppen, die jeweils als zentrales Ion ein dreifach positiv geladenes Eisenion besitzen. Liegt ein Substrat vor, bindet die Katalase zunächst in ihrem aktiven Zentrum ein Wasserstoffperoxidmolekül, so dass der Enzym – Substrat – Komplex und Wasser entstehen. In einem zweiten Schritt zerfällt der Enzym – Substrat- Komplex unter erneuter Bildung eines Wassermoleküls, wobei ein zweites Wasserstoffperoxidmolekül sein Proton abgibt und zu Sauerstoff oxidiert.



Kat(OH)<sub>4</sub>: Katalase; Kat(OH)<sub>3</sub>OOH: aktiver Komplex

(Bergemeyer 1970 S. 440)

### ***Iodradikale***

Für unseren Körper sind die Radikale nicht grundsätzlich von Schaden. Radikale sind in lebenswichtige Abbauprozesse der Zelle und zur Abwehr von eingedrungenen Krankheitserregern eingebunden. Dort wird ihr schädliches Potenzial in Bahnen gelenkt. Allen Radikalen gemeinsam ist, dass ihnen ein Elektron fehlt. Sie sind durch den Elektronenmangel so energiereich, dass sie, wenn die Umgebung es zulässt, die zur Verfügung stehenden Moleküle attackieren, um ihren Mangel auszugleichen. Sind Radikale in geordnete Prozesse eingegliedert, erfolgt die Elektronenweitergabe wie unter Aufsicht.

Iodradikale sind lebensnotwendig. Wer kennt nicht die Empfehlung in iodarmen Trinkwassergegenden Iodionen über das iodierte Kochsalz aufzunehmen. Denn nur wenn die Schilddrüse ausrei-

chend mit Iodionen versorgt ist, unterbleibt die Kropfbildung am Hals, die auf eine Vergrößerung der Schilddrüse zurückzuführen ist. Iod wird als Iodidion mit der Nahrung zugeführt, von den Gewebezellen der Schilddrüse aufgenommen und gespeichert. In den Gewebezellen wird durch Fettsäureabbau bereitgestelltes Wasserstoffperoxid gewinnbringend entsorgt, indem Iodradikale und Wasser entstehen. Die reaktionsfähigen Iodradikale wiederum iodieren Restgruppen des für die Schilddrüse spezifischen Proteins, des Thyreoglobulins. Nach Bedarf werden die Thyreoglobuline um- und abgebaut und die dabei entstehenden Schilddrüsenhormone Thyroxin und Triiodthyronin ausgeschieden.

Fehlen Iodionen, führt das zum Produktionsrückgang der Schilddrüsenhormone. Damit entfällt aber auch die durch die Schilddrüsenhormone ausgelöste Hemmung von Hypophysenhormonen, so dass diese verstärkt in den Blutkreislauf ausgeschieden werden und das Schilddrüsengewebe zum Wachstum anregen. Wird die Schilddrüse vergrößert, vergrößert sich damit auch das Iod aufnehmende Gewebe, wobei die Extraktion aus dem Blut gesteigert wird (Löffler et al. 2000 S. 467 – 472, Bösche – Teuber 1998 S.25 – 34). Eine vergrößerte Schilddrüse kann auf die Luft- und Speiseröhre drücken und zu Atem- und Schluckbeschwerden führen. Treten als Phänomene Müdigkeit, trockene und blasse Haut und ständiges Frieren auf, so sind das Zeichen eines verlangsamten Energiestoffwechsels. Der Verdacht auf eine Schilddrüsenunterfunktion liegt nahe.

Die Empfehlungen hinsichtlich des Iodbedarfs sind unterschiedlich. Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung gibt einen Wert von 200 µg/Tag für Jugendliche und Erwachsene an (Bösch-Teuber 1998 S. 25). Deutschland gilt als Iodmangelgebiet. Zur Iodmangelprophylaxe ist iodiertes und fluoriertes Salz im Handel. Da der mittlere Salzverbrauch zum Würzen bei nur knapp 2 g pro Tag liegt, werden über das Iodsalz nur 40 µg Iod aufgenommen. Der größte Teil der täglichen Salzaufnahme von 8g – 10 g erfolgt über die industriell gefertigten Lebensmittel wie Back- und Fleischwaren. Nach Angaben des Arbeitskreises Iodmangel verwenden inzwischen 80% der Bäckerei – und Fleischereibetriebe iodiertes Speisesalz.

### ***Experimentelle Untersuchung A : Die Katalase - ein hochwirksamer Radikalfänger***

#### ***Variante a: Bestimmung des Geschwindigkeitsgesetzes der katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff***

##### Messmethode

Als Katalasespender wird eine Hefelösung genutzt. Die Hefe reagiert mit Wasserstoffperoxid unter Bildung von Sauerstoff und Wasser. Wird das Sauerstoffvolumen über die Zeit in einem Volumen-Zeit – Diagramm aufgetragen, dann lässt sich über den Verlauf des Graphen das Geschwindig-

keitsgesetz ermitteln. Gewählt wird die Methode der Anfangsgeschwindigkeiten. Innerhalb der ersten Minuten lässt sich der logarithmische Verlauf der Kurve wie eine Gerade behandeln und die Reaktionsgeschwindigkeit ergibt sich als Steigung der Geraden. Die Volumenänderung des entstehenden Sauerstoffs pro Zeiteinheit wird als Maß für die Enzymaktivität genutzt.

#### Geräte und Chemikalien

1 Brettchen, 1 Messer, 500 mL - Becherglas, Rührstab, Hefewürfel (42 g), 20 mL - Becherglas, 10 mL - Pipette mit Peleusball, 100 mL – Messzylinder, Wasserstoffperoxid (w = 30%)(R 34 S (1/2)-28-36/39-45), Stativstange, Klemme, 25 mL - Bürette, Wasserwanne, durchbohrter Stopfen, Verbindungsglasrohr (zweifach gewinkelt, spitz zulaufend), Stoppuhr, Schutzbrille.

#### Vorbereitungen für den Versuch: Herstellung der Hefesuspension

- Zerschneiden Sie mit einem Messer den ganzen Hefewürfel in kleine Stückchen.
- Füllen Sie ein 500 mL – Becherglas bis zur 500 mL - Marke mit Wasser.
- Schütten Sie 42 g Hefekrümel in das Becherglas und rühren Sie mit einem Glasstab so lange, bis sich die Hefelösung vollständig im Wasser gelöst hat.

#### Versuchsdurchführung

- Befestigen Sie an einer Stativstange eine Klemme.
- Stellen Sie eine zu 2/3 gefüllte Wasserwanne auf.
- Füllen Sie eine geschlossene Bürette bis oben mit Wasser, verschließen Sie die Einfüllöffnung mit dem Daumen und drehen Sie die Bürette auf den Kopf. Halten Sie die mit dem Daumen verschlossene Einfüllöffnung der Bürette unter Wasser in die Wasserwanne. Entfernen Sie den Daumen und klemmen Sie die Bürette ein.
- Führen Sie das spitz zulaufende Ende des zweifach gebogenen Winkelrohres in die sich unter Wasser befindende Öffnung der Bürette ein. Stecken Sie das obere Ende des Glasrohres in einen einfach durchbohrten Stopfen. Dieser steckt in einem Reagenzglas, welches sich in einem Reagenzglasständer befindet.
- Durch minimales Öffnen des Bürettenhahns wird der Wasserspiegel in der Bürette nur soweit herabgelassen, bis die Verjüngung des Schellbachstreifens genau auf den Maßstrich der Bürette zeigt.
- Füllen sie etwas mehr als 10 mL 30%ige Wasserstoffperoxidlösung aus der Vorratsflasche in das 20 mL - Becherglas, das beschriftet ist.
- Entnehmen Sie aus dem Becherglas 10 mL und füllen Sie es in einen 100 mL-Messkolben. Füllen Sie diesen genau bis zur 100 mL-Marke auf und stellen Sie ihn in den Kühlschrank.
- Für den ersten Teil des Versuches erstellt man 5 Ansätze, indem Sie mit der Hefepipette in 5 Reagenzgläser je 2,5 mL Hefelösung pipettieren. Dem ersten Ansatz fügen Sie nichts weiter hinzu, zu dem zweiten pipettieren Sie mit der Wasserpipette 1 mL Aqua dest., zu dem dritten 2 mL, zu dem vierten 3 mL und zu dem fünften 4 mL.
- In den ersten Ansatz pipettieren Sie mit der Wasserstoffperoxidpipette 5mL Wasserstoffperoxid hinzu, verschließen Sie so schnell wie möglich das Reagenzglas. Sobald die erste Gasblase zu sehen ist, starten Sie die Stoppuhr,  $t = 0$  min.
- Lesen Sie alle 10 s vier Minuten lang das Volumen ab.
- Nach vier Minuten nehmen Sie den Stopfen vom Reagenzglas, füllen die Bürette in bekannter Weise. Der Wasserspiegel wird wieder genau auf 25 mL herabgelassen und die Stoppuhr wird auf Null gestellt.
- Wiederholen Sie das Verfahren auch bei den anderen Ansätzen.

**Tabelle 19: Pipettierschema 1 zur katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid**

Ansatz		1	2	3	4	5
v(H <sub>2</sub> O)	in mL	0	1	2	3	4
v(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	in mL	5	4	3	2	1
v(Hefelösung)	in mL	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

**Tabelle 20: Pieltierschema 2 zur katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid**

Ansatz		6	7	8	9	10
v(H <sub>2</sub> O)	in mL	0	0,5	1	1,5	2,0
v(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	in mL	5	5	5	5	5
v(Hefelösung)	in mL	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5

### Messungen

- Protokollieren Sie bei allen 10 Ansätzen das Sauerstoffvolumen nach 10 s in einem Zeitraum von vier Minuten.
- Tragen Sie Ihre Messwerte in einem Volumen – Zeit – Diagramm auf.
- Wiederholen Sie den Versuch als qualitatives Experiment und verändern Sie dabei die Temperatur bzw. den pH – Wert.

### Auswertungen

1. Zeichnen Sie an die Kurven der Ansätze 1-10 jeweils eine Tangente durch den Nullpunkt und bestimmen Sie deren Steigung. Sie entspricht jeweils der Anfangsgeschwindigkeit der Reaktion.
2. Tragen Sie die Anfangsgeschwindigkeit über das je nach Ansatz variierte Volumen auf. Bestimmen Sie aus Ihren Messdaten begründet das Geschwindigkeitsgesetz der katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid.
3. Formulieren Sie einen Reaktionsmechanismus, der mit dem Geschwindigkeitsgesetz im Einklang steht.

### Erweiterungen

4. Zeigen Sie, dass bei der Oxidation der Hämgruppe im Hämoglobin zu Fe<sup>3+</sup> das Superoxid-anion entstehen kann (vgl. Stryer 1999 S. 582).
5. Zeigen Sie, dass durch Superoxidationen die Aktivität der Katalase reduziert werden kann.
6. Zeigen Sie, dass durch Superoxidationen und andere Sauerstoffradikale ungesättigte Fettsäurereste in Lipiden abgebaut werden (Belitz et al. 2001 S. 184 und S. 192-193).

### Ergebnisse und Deutungen

Die Katalase beschleunigt die Umsetzung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff. Gemessen wird das Sauerstoffvolumen im Zeitverlauf. Im Sauerstoffvolumen – Zeit – Diagramm liegen Ursprungsgeraden vor. Die Steigung der Geraden entspricht der jeweiligen Reaktionsgeschwindigkeit  $v$ . Sie erniedrigt sich von Ansatz 1 zu Ansatz 5 immer um denselben Betrag. Es liegt eine Proportionalität zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit und der Wasserstoffperoxidkon-

zentration vor. Es handelt sich damit um ein Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung bezüglich der Wasserstoffperoxidkonzentration. Die Reaktion läuft relativ langsam ab, so dass die Methode der Anfangsgeschwindigkeit angewendet werden kann.

Wird anstatt des Wasserstoffperoxidvolumens das Volumen der Enzymlösung verändert, so ergeben sich ebenfalls Ursprungsgeraden im Sauerstoffvolumen – Zeit - Diagramm, deren Steigungen nahezu konstant sind. Daraus ergibt sich, dass die Umsetzung von Wasserstoffperoxid unabhängig von der Enzymkonzentration erfolgt. Die Reaktion folgt im gewählten Messbereich dem Geschwindigkeitsgesetz nullter Ordnung bezüglich der Katalasekonzentration und erster Ordnung bezüglich der Wasserstoffperoxidkonzentration.

### ***Variante b: Die Bestimmung der Michaelis Konstanten im gekoppelten optischen Test<sup>23</sup>.***

#### Messprinzip: Der gekoppelte optische Test

Im optisch enzymatischen Test wird die spezifische Absorption von NADPH bei einer Wellenlänge von 340 nm genutzt. Die oxidierte Form des Coenzym NADP<sup>+</sup> weist keine Absorption im UV – Bereich auf. Reaktionen, bei denen NADP<sup>+</sup> zu NADPH reduziert wird, zeigen in der photometrischen Messung eine steigende Absorption im Zeitverlauf. Der durch Katalase katalysierte Abbau von Wasserstoffperoxid ist nicht von NADP<sup>+</sup> abhängig. Dennoch lässt sich die Katalaseaktivität bestimmen. Das Prinzip des gekoppelten Tests ist, dass man eine Indikatorreaktion, in der ein Umsatz von NADP<sup>+</sup> stattfindet, an eine Messreaktion anschließt, in der Wasserstoffperoxid katalytisch zersetzt wird.

Folgende Mess- und Indikatorreaktionen werden genutzt:

Messreaktion:



Indikatorreaktion:



a: Katalase

b: Ethanaldehydrogenase

Die Katalase bildet bei der Reaktion 1 zuerst mit einem Wasserstoffperoxidmolekül einen Komplex, und dieser oxidiert ein Ethanolmolekül zu einem Ethanalmolekül, wobei aus dem Katalase - Wasserstoffperoxid - Komplex wieder Katalase frei wird. Bei der Reaktion entsteht Wasser. Das in der Reaktion 1 entstandene Ethanal wird in der Indikatorreaktion oxidiert, wobei die Ethanaldehydrogenase das Wasserstoffatom des Ethanals auf ein NADP<sup>+</sup> - Ion überträgt.

---

<sup>23</sup> Der Versuch wurde von zwei Schülern im Rahmen ihrer Facharbeit (Oellerich und Schmid 2001) mit der freundlichen Unterstützung von Frau Dr. Gottschalk und Prof. Dr. Oellerich durchgeführt.

Der Gesamtumsatz von Wasserstoffperoxid durch die Katalase entspricht bei dieser Reaktionskopplung stöchiometrisch der Bildung von NADPH in der Indikatorreaktion. Das heißt, dass aus einem Mol Ethanol und einem Mol Wasserstoffperoxid ein Mol Ethansäure entstehen. In der Indikatorreaktion wird nur so viel umgesetzt, wie in der Messreaktion als Produkt anfällt. Da die Messreaktion geschwindigkeitsbestimmend ist, kann diese Kopplung zur Bestimmung der Katalaseaktivität verwendet werden. Dabei wird die Katalaseaktivität als Extinktionsänderung pro Minute gemessen. Das in der Messreaktion verwendete Ethanol liegt im Überschuss vor. Daher ist die Katalaseaktivität nur von der Wasserstoffperoxidkonzentration abhängig.

### Geräte und Chemikalien

UV Photometer, PC mit Messwerterfassung, 10 Reagenzgläser, 100 mL – Messkolben, zwei 50 mL – Bechergläser, 9 Küvetten, Eppendorfpipetten: 1000 µL, 500µL, 200µL, 100 µL, 50 µL, 10 µL, Eis, Parafilm, Alufolie, Schutzbrille, Wasserstoffperoxid (w = 30%) (R 34 S (1/2)-28-36/39-45), destilliertes Wasser,

50 mL Pufferlösung mit folgender Zusammensetzung: Phosphatpuffer  $c = 45$  mmol/L, Ethanol  $c = 1,43$  mol/L (R 11 S(2)-7-16),

Enzymreagenz mit folgender Zusammensetzung:  $c(\text{NADP}^+) = 0,25$  mmol/L; Katalase  $>1000$  kU/L, Aldehyd – Dehydrogenase  $> 370$  U/L.

### Vorbereitungen für den Versuch:

Der Ansatz der Lösungen richtet sich nach der Versuchsvorschrift von Rolf Greiner BioChemica®. Die Enzymreagenzien und Pufferlösungen werden von BioChemica® unter der Bestell- Nr. G 56217 vertrieben.

**Tabelle 21: Herstellung der Wasserstoffperoxid - Konzentrationen**

Nr.	Mischverhältnis	$v(\text{H}_2\text{O}_2)$ in mL	$v(\text{H}_2\text{O})$ in mL	$c(\text{H}_2\text{O}_2)$ in mol/L	$c(\text{H}_2\text{O}_2)$ im Testansatz (1,05 mL) in mmol/L
1	1:6	0,2	1	1,63	77,6
2	1:11	0,1	1	0,89	42,42
3	1:22	1 (aus Verdünnung 1:11)	1	0,445	21,21
4	1:51	0,01	0,5	0,192	9,15
5	1:100	1	99 (Der Messkolben wird auf 100 mL aufgefüllt.)	0,098	4,67
		<b>Jeweiliges Volumen aus der Verdünnung 1:100</b>			
6	1:200	1	1	0,049	2,33
7	1:500	1	4	0,0196	0,94
8	1:1100	0,1	1	0,0089	0,42
		<b>Volumen aus der Verdünnung 1:500</b>			
9	1:5500	0,1	1	0,00178	0,084

### ***Herstellung der NADP<sup>+</sup>-Konzentration, der Katalase- und der Aldehyd-Dehydrogenaselösung:***

- Gelöst werden 49,2125 mg NADP<sup>+</sup> in 25 mL.
- Zur Herstellung der Pufferlösung wiegen Sie 310,482 mg Natriumhydrogenphosphat - Monohydrat in 3,294g absolutem Alkohol ein, um 50 mL der geforderten Pufferlösung zu erhalten.
- Lösen Sie gefriergetrocknete ADH in 2 mL Kochsalzlösung (w = 0,9%) sanft auf einem Rollmischer.
- Verdünnen Sie 0,2 mL der ADH – Lösung mit 0,8 mL Kochsalzlösung (w = 0,9%).
- Verdünnen Sie die in der Vorratsflasche enthaltene Katalaselösung im Verhältnis 1:10. Dazu werden 0,1 mL Katalaselösung mit 0,9 mL Kochsalzlösung (w = 0,9%) verdünnt.
- Lösen Sie die Enzymlösungen in 50 mL der hergestellten Pufferlösung. Diese Testlösung wird mit Parafilm verschlossen und in Eis gekühlt.

### Versuchsdurchführung

1. An das Photometer wird ein Wasserbad von 37°C angeschlossen.
2. Stellen Sie 9 Substratansätze mit unterschiedlichen Wasserstoffperoxidkonzentrationen, so wie sie in der Tabelle aufgeführt sind, her.
3. Beschriften Sie die Reagenzgläser, decken Sie die Reagenzgläser mit Parafilm ab, wickeln Sie die Reagenzgläser in Alufolie und kühlen Sie die Reagenzgläser im Eisbad (Wasserstoffperoxid zersetzt sich bei Raumtemperatur!).
4. Vor jeder Messung werden 1000 µL der Testlösung in eine Küvette pipettiert und in das Photometer gestellt. Nach drei Minuten hat sich die Testlösung auf 37° C erwärmt.
5. Geben Sie nach drei Minuten 50 µL des entsprechenden Substratansatzes in die mit dem Testansatz gefüllte Küvette. Rühren Sie den Inhalt der Küvette mit dem Rührstab schnell und sorgfältig um.
6. Die Extinktion wird automatisch alle 6 s abgelesen und gespeichert.
7. Die Schritte 3 – 5 werden für jede angesetzte Substratkonzentration wiederholt.

### Messungen

1. Protokollieren Sie für jeden Substratansatz die Extinktion im Zeitverlauf.
2. Tragen Sie Ihre Messwerte pro Substratansatz in ein E – t – Diagramm auf.

### Auswertungen

3. Bestimmen Sie mit Hilfe Ihrer Messwerte für jeden Testansatz die Anfangsaktivität der Katalase in  $\frac{\mu\text{mol}}{\text{min}\cdot\text{mL}}$ . Bilden Sie dazu die Differenz zweier Extinktionswerte und bestimmen Sie den Differenzenquotienten  $\frac{\Delta E}{\text{min}}$ . Bestimmen Sie aus dem Differenzenquotienten die jeweilige Katalaseaktivität in  $\frac{\mu\text{mol}}{\text{min}\cdot\text{mL}}$ .
4. Tragen Sie die Katalaseaktivität pro mL in Abhängigkeit von der Wasserstoffperoxidkonzentration auf.
5. Deuten Sie den Verlauf des Graphen.

### Erweiterung

6. Wenden Sie zur Linearisierung des Graphen das Lineweaver – Burk – Verfahren an. Tragen Sie dazu den Kehrwert der Katalaseaktivität über den jeweiligen Kehrwert der Wasserstoffperoxidkonzentration auf.
7. Deuten Sie den Verlauf des Graphen.
8. Wie lässt sich prinzipiell die Michaeliskonstante bestimmen? Ist das Verfahren zur Bestimmung der Michaeliskonstante im gegebenen Versuch anwendbar?

## Ergebnisse und Deutungen

**Tabelle 22: Katalaseaktivität bei unterschiedlichen Wasserstoffperoxid - Konzentrationen**

Nr.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> - Mischverhältnis	c(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) im Test in mmol/L	ΔE/min	Katalaseaktivität in μmol/min·mL
1	1:5500	0,084	0,35	5,83
2	1:1100	0,42	0,518	8,63
3	1:500	0,94	0,593	9,88
4	1:200	2,33	0,6	10
5	1:100	4,67	0,653	10,58
6	1:51	9,15	0,610	10,17
7	1:22	21,21	0,571	9,52
8	1:11	42,42	0,539	8,98
9	1:6	77,6	0,422	7,03

Bei der Messreihe 1 wird nur die Differenz der ersten beiden Extinktionen zur Bestimmung der Anfangsaktivität verwendet, da die Aktivität sehr schnell abnimmt. Bei den Messreihen 2,3 und 4 werden die Mittelwerte der ersten drei Extinktionswerte gebildet. Bei den Messreihen 5 und 6 wird jeweils nur der erste Differenzenquotient gebildet, weil die Messungen etwas später begonnen wurden (Oellerich & Schmid 2001 unveröffentlicht).

In der Indikatorreaktion wird die Zunahme der Konzentration von NADPH im Zeitverlauf gemessen. Die Zunahme der NADPH – Konzentration entspricht der Abnahme der Wasserstoffperoxidkonzentration pro Zeiteinheit. Die Änderung der Wasserstoffperoxidkonzentration entspricht der Enzymaktivität. Die Enzymaktivität ist definiert als 1 μmol Substratumsatz pro Minute.

Nach dem Lambert – Beerschen – Gesetz ist die Extinktion proportional der Konzentration. Der Proportionalitätsfaktor ist das Produkt aus dem Extinktionskoeffizienten und der Küvettschichtdicke. Für das reduzierte Coenzym NADPH beträgt der millimolare Extinktionskoeffizient bei einer Wellenlänge von 340 nm  $6,3 \text{ L}\cdot\text{mmol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Die Schichtdicke der Küvette beträgt immer 1 cm.

Für c(NADPH) gilt:

$$c_{(\text{NADPH})} = \frac{E \cdot V}{\epsilon \cdot d \cdot v} \quad (V: \text{Gesamtvolumen} = 1,05 \text{ mL}; v: \text{Volumen von H}_2\text{O}_2 = 0,05 \text{ mL})$$

Für die Enzymaktivität der Messreihe 1 (s.o.) gilt:

$$\frac{U}{\text{mL}} = \frac{0,35 \cdot 1,05 \cdot \text{mL} \cdot \text{mmol} \cdot \text{cm}}{6,3 \cdot \text{min} \cdot \text{L} \cdot \text{cm} \cdot 1 \text{mL}} = 0,0583 \frac{\mu\text{mol}}{\text{min} \cdot \text{mL}}$$

In der Darstellung, in der die Katalaseaktivität über die entsprechende Wasserstoffperoxidkonzentration aufgetragen wird, liegt eine Kurve vor, deren Hochpunkt die Werte 4,67 mol/L; 10,58  $\mu\text{mol}/\text{mL}\cdot\text{min}$  besitzt. Im Konzentrationsbereich von 0 – 4,67 mmol/L steigt der Graph an; dieser Abschnitt ist hyperbol. In dem nahezu linearen Teil der hyperbolen Kurve gilt das Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung bezüglich der Wasserstoffperoxidkonzentration. Die Ethanolkonzentration bleibt unberücksichtigt, da sie im großen Überschuss vorliegt.

Für die Konzentrationen, die größer als 4,7 mmol/L sind, ist der Graph streng monoton fallend. Die Geschwindigkeit nähert sich keinem Grenzwert an. Da immer unter denselben Bedingungen gemessen wird, kann von einer Substrathemmung ausgegangen werden (vgl. Bergemeyer 1970 S. 637). Es kommt zur Substrathemmung, wenn sich ein zweites Substratmolekül oder mehrere Substratmoleküle fest an einen gebildeten Enzym – Substrat – Komplex anbinden und somit als Inhibitoren fungieren. Dabei geht man davon aus, dass das Enzym über mehrere Stellen verfügt, an die ein Substrat binden kann. Bei höherer Substratkonzentration tritt das öfter ein. Das führt zur Inaktivierung, der sogenannten Substratüberschusshemmung.

### ***Die Bestimmung und Diskussion des des $K_M$ – Wertes***

Beim Lineweaver – Burk - Verfahren wird der Kehrwert der Enzymaktivität über dem Kehrwert der Substratkonzentration aufgetragen. In einem Bereich von 0 – 4,67 mmol/L lässt sich die Kurve durch die doppeltreziproke Auftragung linearisieren. Es liegt eine streng monoton steigende Gerade vor. Die durch die Messwerte gelegte Ausgleichsgerade folgt der folgenden Geradengleichung:

$$f(x) = 0,0606388 \cdot x + 0,096193 \text{ (Oellerich und Schmid 2001)}$$

Für die Nullstelle  $f(x) = 0$  ergibt sich demnach

$$\frac{-0,096193}{0,0606388} = x_N = -\frac{1}{K_M} = -15,0583 \text{ L/mmol}$$

Der Wert des Schnittpunktes der Gerade mit der Abszisse entspricht dem Quotienten  $-\frac{1}{K_M}$

Daraus folgt:  $K_M = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$

Liegt eine Substrathemmung vor, gehorchen nicht mehr alle Messwerte im Lineweaver – Burk - Diagramm der oben formulierten Geradengleichung. Wenn die Messwerte im Bereich von 0 – 4,67 mmol/L einer Geradengleichung folgen, heißt das aber nicht, dass die im gewählten Messbereich nicht messbare maximale Reaktionsgeschwindigkeit keine Auswirkungen auf den grafisch bestimmbaren Wert des  $K_M$  – Wertes hat. Die Messwerte liegen, wenn die Maximalgeschwindigkeit nicht im gewählten Messbereich erreicht wird, zu weit im rechten Bereich des Lineweaver – Burk – Diagramms, so dass der Schnittpunkt mit der Abszisse im Extremfall der Ursprung ist. Damit wird der Abzissenabschnitt nicht eindeutig bestimmbar. Der experimentell ermittelte  $K_M$  – Wert der Katalase von  $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$  ist daher nicht zuverlässig.

### ***Variante c: Die Abhängigkeit der Katalaseaktivität von der Temperatur***

#### Messprinzip: Der gekoppelte optische Test

Die Katalaseaktivität wird photometrisch mit Hilfe des gekoppelten optischen Tests gemessen. Die Wasserstoffperoxidkonzentration, der pH – Wert und das Volumen der Enzymlösung werden konstant gehalten und nur die Temperatur wird verändert.

#### Geräte und Chemikalien

Photometer, PC, temperiertes Wasserbad, Thermometer, 5 Küvetten, Küvettenhalter, Eppendorf – Pipetten, 2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, zwei 50 mL – Bechergläser, Parafilm, Rührstäbchen, Eis, isolierte Wanne. Wasserstoffperoxidlösung (w = 30%) (R 34 S (1/2)-28-36/39-45), Testlösung (siehe Enzymlösung in Variante b), destilliertes Wasser.

#### Versuchsdurchführung

1. Schalten Sie das Wasserbad, das Photometer und den PC ein.
2. Stellen Sie am Wasserbad die gewünschte Temperatur ein.
3. Der Hahn des Wasserzulaufs sollte nicht zu stark oder zu schwach aufgedreht werden, damit die Temperatur im Wasserbad konstant bleibt.
4. 0,2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (w = 30%) und 1 mL Aqua dest. werden in ein Reagenzglas pipettiert.
5. Beschriften Sie das Reagenzglas, schütteln Sie, decken Sie es mit Parafilm ab und stellen Sie es in eine mit Eis gefüllte Wanne.
6. In ein zweites Reagenzglas werden ca. 10 mL der in Variante b hergestellten Pufferlösung pipettiert. Dieses Rg wird ebenfalls in die Wanne gestellt.
7. Füllen Sie eine Küvette mit 1 mL der in Variante b hergestellten Testlösung. Stellen Sie die Küvette zum Vorwärmen 5 Minuten in das Photometer.
8. Nach 5 Minuten geben Sie 50 µL der hergestellten Wasserstoffperoxidlösung in die Küvette, rühren Sie kurz um und starten Sie die Reaktion.
9. Die Extinktionen werden automatisch alle 6 s in einem Zeitraum von mehr als 3 Minuten aufgenommen.
10. Die Messungen werden bei 20°C, 25°C, 30°C und 40°C wiederholt. Nach jeder Messung wird das Wasserbad auf die gewünschte Temperatur eingestellt. Ebe die nächste Messung begonnen wird, sollte 5 Minuten gewartet werden, bis die gewünschte Temperatur auch auf dem Thermometer angezeigt wird.

#### Ergebnisse und Deutungen

**Tabelle 23: Katalaseaktivität in Abhängigkeit von der Temperatur**

Temperatur	in °C	ΔE/min	Katalaseaktivität	in µmol/mL·min
15		0,1201		2,0024
20		0,3341		5,5683
25		0,2234		3,7238
30		0,1911		3,1843
40		0,0880		1,4672

Das Temperaturoptimum liegt bei 20°C. Bei dieser Temperatur ist die Katalaseaktivität am höchsten. Bis zum Temperaturoptimum nimmt bei Temperaturerhöhung der Anteil der Teilchen zu, die über die Energie verfügen, die zur Reaktion nötig ist. Erhöht sich der Anteil energiereicher Teilchen, erhöht sich auch die Reaktionsgeschwindigkeit. Ist das Temperaturoptimum überschritten, erniedrigt sich die Reaktionsgeschwindigkeit trotz Temperaturerhöhung. Die Ursache liegt in der chemischen Natur der Enzyme. Zur Bildung des Enzym – Substratkomplexes werden intermole-

kulare Bindungen zwischen Enzym und Substrat ausgebildet. Die räumliche Orientierung der beteiligten Gruppen von Substrat und Enzym im Enzym – Substrat – Komplex ist temperatursensitiv und zeigt seine adäquateste Struktur bei 20°C. Der Literaturwert wird mit 21°C angegeben (Hedewig 1991 S. 43).

#### ***Versuch d : Die Untersuchung der Abhängigkeit der Katalaseaktivität vom pH – Wert***

##### Geräte und Chemikalien

Analysenwaage, 5 Kunststoffschalen, 100 mL – Bechergläser, Rollmischer, Eppendorf – Pipetten, Photometer, PC, temperiertes Wasserbad, Küvetten, 15 Reagenzgläser, Parafilm, mehrere Rührstäbchen, Eis, Wanne, 250 mL – Bechergläser, Spatel, 25 mL – Messzylinder, 50 mL – Messkolben, Pasteurpipetten, pH – Meter, Magnetrührer, Rührmagneten, Reagenzglasständer, Schutzbrille,

Aqua dest., 1 molare NaOH – Lösung (R 35 S (1/2)-26-37/39-45), HCl (R 34-37 S (1/2)-26-45), Ethanol (R 11 S (2)-7-16), Natriumhydrogenphosphat - Monohydrat (R 34-37 S (1/2)-26-36/37/39-45), NADP<sup>+</sup>, Katalase, Aldehyd – Dehydrogenase (ADH), NaCl – Lösung (w = 09%), Wasserstoffperoxid (w = 30%) (R 34 S (1/2)-28-36/39-45).

##### *Herstellung des Phosphatpuffers mit unterschiedlichen pH – Werten*

1. 310,5 mg Natriumhydrogenphosphat - Monohydrat (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) werden in eine Kunststoffschale eingewogen. Der Vorgang wird fünfmal wiederholt.
2. In ein zum Versuchssatz gehörendes Fläschchen, das 49,2125 mg NADP<sup>+</sup> enthält, werden 25 mL Aqua dest gefüllt und langsam mit einem Rollmischer gemischt.
3. Das Natriumhydrogenphosphat, das sich in jedem der fünf Kunststoffschalen befindet, wird schalenweise in eins der fünf Bechergläser gegeben. In jedes der Bechergläser werden 5 mL des gelösten NADP<sup>+</sup> pipettiert.
4. Die Bechergläser werden beschriftet und jeweils gewogen. In jedes der Bechergläser werden mit Hilfe einer Pasteurpipette 3,29 g Ethanol gegeben. Jedes der Bechergläser wird mit einem Rührmagneten versehen. Becherglas 1 stellt man auf einen Magnetrührer, schaltet diesen auf eine mittlere Stufe und misst den pH – Wert mit einem pH – Meter.
5. Währenddessen werden in zwei 20 mL – Bechergläser jeweils etwas NaOH bzw. HCl gefüllt und beschriftet.
6. Mit einer zweiten Pasteurpipette wird so lange HCl geträufelt um den pH – Wert zu senken und NaOH um den pH – Wert zu heben, bis das pH – Meter einen pH – Wert von 5 anzeigt. Ist der pH – Wert von 5 erreicht, stellt man den Magnetrührer aus, entnimmt und spült das pH – Meter und zieht mit einem Magneten den Rührmagneten aus der Lösung.
7. Mit den Bechergläsern 2 bis 5 wird genau so verfahren wie mit Becherglas 1, nur, dass man bei Becherglas 2 einen pH – Wert von 6, bei Becherglas 3 einen pH – Wert von 7, bei Becherglas 4 einen pH – Wert von 8 und bei Becherglas 5 einen pH – Wert von 9 erreichen muss.
8. Der Inhalt der Bechergläser wird jeweils in einen entsprechend beschrifteten 50 mL - Messkolben gegeben, dieser wird mit Aqua dest. auf 50 mL aufgefüllt und durch mehrfaches Umdrehen geschüttelt.

##### *Herstellung des Enzymreagenz*

9. 2 mL NaCl (w = 0,9%) werden in das Fläschchen mit gefriergetrockneter ADH pipettiert. Die Lösung wird auf einem Rollmischer 15 Minuten sanft durchmischt.
10. 0,1 mL Katalase werden aus der Vorratsflasche mit 0,9 mL Aqua dest. in einem Reagenzglas gemischt. Das Reagenzglas wird zugleich zum Kühlen in eine mit Eis gefüllte Wanne gestellt.
11. Nach 15 Minuten werden dem ADH – Fläschchen 0,2 mL entnommen und mit 0,8 mL NaCl (w = 0,9%) versetzt, um eine 1:5 – Verdünnung zu erreichen.

12. In 5 beschriftete Reagenzgläser werden jeweils 0,11 mL der erstellten ADH Lösung (1:5) und 0,11 mL der erstellten Katalaseverdünnung und 10 mL des Phosphatpuffers mit dem jeweils entsprechenden pH – Wert gegeben.

#### *Herstellung der Wasserstoffperoxidlösung*

In ein beschriftetes Reagenzglas werden ca. 2 mL Wasserstoffperoxid (w = 3%) pipettiert. In ein zweites Reagenzglas Aqua dest.

In ein drittes beschriftetes Reagenzglas werden 0,2 mL Wasserstoffperoxid und 0,8 mL Aqua dest. gegeben. Aus diesem Reagenzglas wiederum pipettiert man 0,1 mL in ein viertes beschriftetes Reagenzglas, in welches man 9 mL Aqua dest. gibt. Somit wird eine fünfmal verdünnte Lösung nochmals zehnfach verdünnt. Insgesamt liegt damit eine fünfzigfache Verdünnung vor. Das Reagenzglas wird mit Alufolie umwickelt mit Parafilm verschlossen und ins Eisbad gestellt.

#### Messungen

- Aus einem der in der Vorbereitung erstellten fünf Ansätzen wird 1 mL in eine Küvette pipettiert.
- Die Küvette wird 3 Minuten zum Anwärmen in das Photometer gestellt.
- Dann werden 0,05 mL Wasserstoffperoxidlösung aus der 1:50 Verdünnung hinzu pipettiert, umgerührt und die photometrische Messung wird gestartet.
- Nach 5 Minuten wird die Messung beendet.
- Die vorangegangenen Schritte werden mit den übrigen Ansätzen wiederholt.
- Es wird ein pH – Wert ermittelt, der zwischen den beiden pH – Werten mit der größten Steigung liegt. Ein Ansatz wird auf diesen pH – Wert eingeeicht.

#### Auswertungen

1. Bestimmen Sie die Katalaseaktivität für den jeweiligen pH – Wert.
2. Tragen Sie Ihre Werte in ein Aktivitäts- pH – Diagramm.
3. Deuten Sie Ihre Werte.

#### Ergebnisse und Deutungen

**Tabelle 24: Katalaseaktivität in Abhängigkeit vom pH - Wert**

pH - Wert	5	6	7	7,45	8	9
<b>Katalaseaktivität</b> in $\Delta E/\text{min}$	0,0108	0,0215	0,03974	0,053	0,036	0,0345
<b>Katalaseaktivität</b> in U/mL	0,18	0,3583	0,623	0,883	0,6	0,575

Das pH – Optimum der Katalase liegt in der Nähe des pH – Wertes von 7,45. Dort findet sich der globale Hochpunkt der Kurve. Der Literaturwert wird zwischen 6,8 und 7,4 angegeben (Hedewig 1991 S. 43).

## **Experimentelle Untersuchung B: Die säurekatalysierten Reaktion von $H_2O_2$ mit Kaliumiodid**

### Geräte und Chemikalien

5 mL – Pipetten, Pipettierhilfen, 100 mL Erlenmeyerkolben, Photometer, Küvetten, Stoppuhr, Wasserstoffperoxid (R 34 S (1/2)-28-36/39-45), Salzsäure (R 36/37/38 S (2)-28), Kaliumiodid, Aqua dest.

### Messungen

1. Die säurekatalysierte Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Kaliumiodid wird photometrisch bei 520 nm verfolgt. 5 mL Wasserstoffperoxidlösung werden mit 5 mL Salzsäure und 5 mL Wasser in einem 100 mL – Erlenmeyerkolben gemischt. Sie starten die Reaktion, wenn Sie 5 mL Kaliumiodidlösung hinzugeben.
2. Verdoppeln Sie in Parallelversuchen die Konzentration je eines Reaktionsteilnehmers.
3. Stellen Sie die Reaktionsgemische nach folgender Vorschrift her und messen Sie photometrisch den Reaktionsverlauf.
4. Nehmen Sie in einem Zeitraum von 5 Minuten alle 30 s einen Messwert auf und protokollieren Sie Ihre Messwerte.

**Tabelle 25: Pipettierschema zur säurekatalysierte Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Kaliumiodid**

Ansatz – Nr.	v( $H_2O_2$ ) in mL	v(HCl) in mL	v( $H_2O$ ) in mL	v(KI) in mL
1	5	5	5	5
2	10	5	0	5
3	5	5	0	10

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem E – t – Diagramm dar.
2. Bestimmen und formulieren Sie das Geschwindigkeitsgesetz der Reaktion und begründen Sie Ihren Vorschlag aus dem Verlauf der aufgenommenen Graphen.
3. Formulieren Sie die Reaktionsschemata der Teilreaktionen und der Gesamtreaktion und verdeutlichen Sie mit Hilfe von Oxidationszahlen die Oxidation und die Reduktion.
4. Schlagen Sie einen Reaktionsmechanismus vor, der mit dem Geschwindigkeitsgesetz vereinbar ist und erläutern Sie Ihre Überlegungen.

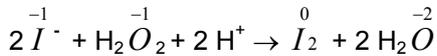
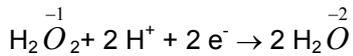
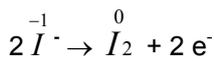
### Ergebnisse und Deutungen

Im E – t – Diagramm liegen drei Geraden vor, wobei zwei parallel zueinander sind. Bei Verdopplung der Konzentration von Kaliumiodid und bei Verdopplung der Konzentration von Wasserstoffperoxid erhöht sich jeweils die Steigung der Geraden um das Doppelte.

Da bei der verwendeten Messmethodik die Geradensteigung der Reaktionsgeschwindigkeit entspricht, ist die Reaktionsgeschwindigkeit proportional zur Konzentration von Kaliumiodid und proportional zur Konzentration von Wasserstoffperoxid. Es handelt sich um ein Geschwindigkeitsgesetz zweiter Ordnung, erster Ordnung bezüglich der Iodionenkonzentration und erster Ordnung bezüglich der Wasserstoffperoxidkonzentration.

Das Geschwindigkeitsgesetz lautet:  $v = -k \cdot c(I^-) \cdot c(H_2O_2)$

Redoxreaktion:

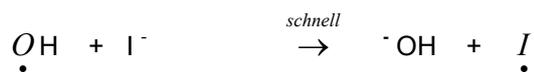
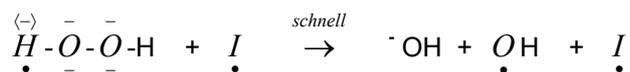
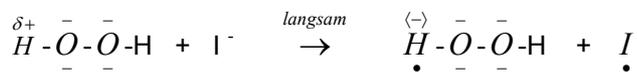


Möglicher Mechanismus, der mit dem Geschwindigkeitsgesetz vereinbar ist:

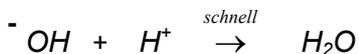
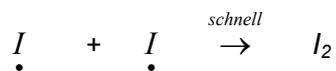
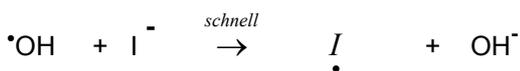
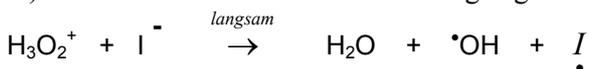
Am geschwindigkeitsbestimmenden Schritt sind zwei Teilchen beteiligt. Im langsamsten Schritt kann ein nukleophiler Angriff des Iodions an den positiv polarisierten Wasserstoff des Wasserstoffperoxid-Moleküls erfolgen mit gleichzeitiger Übertragung von einem Elektron, so dass ein Iodradikal und ein negativ geladenes Wasserstoffperoxidion als kurzlebige Zwischenprodukte entstehen. Da die Reaktion im sauren Medium stattfindet, ist es wahrscheinlicher, dass dem geschwindigkeitsbestimmenden Schritt ein Gleichgewicht vorgelagert ist, in dem protoniertes Wasserstoffperoxid vorliegt, das im Vergleich zu partiell positiv geladenen Wasserstoffperoxidmolekülen bevorzugt von Iodionen angegriffen wird. In beiden Fällen entstehen als kurzlebige Zwischenprodukte einerseits Iodradikale, die zu Iodmolekülen reagieren und andererseits Hydroxylradikale, die letztendlich zur Wasserbildung führen.

Möglich sind folgende Elementarreaktionen, die dem experimentell ermittelten Geschwindigkeitsgesetz folgen:

a.) Elementarreaktionen ohne ein vorgelagertes Protonierungsgleichgewicht



b.) Elementarreaktionen mit einem vorgelagerten Protonierungsgleichgewicht



#### 4. Untersuchungsplan zum Lernzyklus , Atmen unter Extrembedingungen'

Der Untersuchungsplan der vorliegenden Arbeit ist eingebettet in eine qualitative Forschungskonzeption, die *Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung*, die von Eilks und Ralle (2002) entwickelt wurde. Sie ist ein für die Chemiedidaktik neu veröffentlichtes Design der qualitativen Forschung und ein spezielles Modell für eine praxisnahe, curriculare Entwicklungsforschung. Vorrangig geht es um die Entwicklung und Evaluation neuer Unterrichtskonzepte sowie deren Implementation.

Die *Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung* erforscht vergleichend die Bedingungen und Wirkungen sozialen Handelns in bezug auf die Effizienz des Unterrichts. Die Betroffenen werden weitgehend am Forschungsprozess beteiligt und als gleichberechtigte Experten bei der Entscheidung von inhaltlichen und methodischen Fragen behandelt. Mit Hilfe geeigneter Erhebungstechniken werden beteiligte Schüler und Lehrer in den Untersuchungsprozess mit einbezogen, um möglichst detaillierte Befunde aus unterschiedlichen Perspektiven zu erschließen.

Der Ansatz verfolgt nach Eilks und Ralle (2002) eine zyklische Strategie. Zu Beginn stehen Probleme und Defizite, die analysiert und formuliert werden. Eine Neukonzeption wird entwickelt mit dem Ziel, die Defizite abzumildern. Die Neukonzeption wird in der Praxis erprobt, evaluiert, überarbeitet und erneut erprobt. An diese erste Phase schließt sich in diesem Modell eine zweite Phase an, in die Praktiker einbezogen werden, die an der Entwicklung und Erprobung nicht teilgenommen haben. Das Ziel ist, dass eine erneute Überprüfung der Konzeption und der sich daraus ergebenden Konsequenzen stattfindet. Am Ende dieser zweiten Phase steht eine erste grundlegende Evaluation mit mehreren Lerngruppen. In der dritten Phase sollte dann überprüft werden, ob die neuen Konzepte ausreichend dokumentiert sind, so dass der weitere erfolgreiche Einsatz im Unterricht ohne individuelle Betreuung möglich wird.

Im Rahmen der zyklischen Strategie der *Partizipativen Fachdidaktischen Aktionsforschung* lässt sich die vorliegende Untersuchung in die erste oder in den Beginn der zweiten Phase des Modells einordnen. Die Untersuchende hat die Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ nach Kriterien der moderat konstruktivistischen Lerntheorie und des *situativen* Lernens in einer Pilotstudie entwickelt und eine singuläre Erprobung durchgeführt, um die generelle Tauglichkeit zu testen. Der kontextualisierte Lernzyklus wurde von zwei weiteren Kollegen erprobt, die an der Entwicklung des Kontextes nicht beteiligt waren. Die Erprobungen des Lernzyklus können zusammengefasst als Fallstudie aufgefasst werden (vgl. Lamnek 1995 S.4-8, Mayring 1999 S. 28-32).

In dieser Fallstudie werden folgende Hypothesen überprüft:

Die kontextorientierte und multiperspektivisch ausgerichtete Unterrichtsorganisation des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘

- enthält bedeutsam eingeschätzte Lerninhalte,
- weckt Interesse,
- ist verknüpft mit einem hohen Maß an Eigentätigkeit und Eigenverantwortung,
- wirkt sich auf das Kompetenz- und Autonomieempfinden aus,
- beeinflusst die positive Erlebnisqualität und die Lernmotivierung in der Lernsituation,
- fördert die Behaltenleistung,
- führt zu einem strukturierten und anschlussfähigen Wissen,
- verändert die Lehrerrolle zum Moderator und Lernberater,
- erhöht die Medienkompetenz.

Im Frühjahr 2000 wurde von der Untersuchenden ein Vortest durchgeführt. Der Test diente dazu, Material und Experimente zum Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Der Vortest wurde in einem Grundkurs des 12. Jahrganges am Theodor – Heuss – Gymnasium in Göttingen durchgeführt. Für die Fallstudie wurden drei Untersuchungsgruppen ausgewählt. Es handelt sich dabei vorwiegend um Chemieleistungskurse im 12. Jahrgang. Zwei der untersuchten Leistungskurse fanden zu unterschiedlichen Zeiten am Theodor – Heuss – Gymnasium in Göttingen statt, die Gruppe HOF im Herbst 2000 und die Gruppe KSN im Herbst 2001. Bei der dritten Untersuchungseinheit, der Gruppe WLK, handelte es sich um einen gemischten Grund – und Leistungskurs, der 14 Grundkurschüler und 6 Leistungskurschüler enthielt. Die Unterrichtseinheit fand im Winter 2001/2002 in Bückeberg statt. In allen Untersuchungseinheiten fand im Rahmen von 30 Unterrichtsstunden der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ statt, der nach der Konzeption *Chemie im Kontext* entwickelt worden war. Alle beteiligten Schüler und Schülerinnen hatten die Gelegenheit, an einem Tauchkurs teilzunehmen, der parallel zum Lernzyklus angeboten wurde.

Das Forschungsdesign der Fallstudie greift auf qualitative Erhebungstechniken für die nötige Datensammlung zurück. Dazu gehören die in dieser Untersuchung angewandten Verfahren wie das problemzentrierte Interview, die Gruppendiskussion und die teilnehmende Beobachtung. Dazu zählt auch das offene Antwortformat in der Befragung (vgl. Mayring 1999 S. 50 – 61, Lamnek 1995 S. 8-34). Die Wissensdiagnose erfolgt durch die Auswertung von Concept-Maps und Leistungstests. Im Rahmen der Untersuchung werden nicht nur qualitative sondern auch quantitative Methoden der Datenerhebung eingesetzt. Genutzt werden Methoden der deskriptiven Statistik, zu denen die Bestimmung der Mittelwerte und der entsprechenden Standardabweichungen gehören. Darüber hinaus werden in dieser Untersuchung

Korrelationsfaktoren und t – Werte als Kenndaten bestimmt, die über die statistische Beschreibung der untersuchten Gruppen hinaus, prinzipiell geeignet sind, Hypothesen statistisch zu überprüfen (vgl. Bortz & Döring 1995 S. 459).

Die vorliegende Untersuchung ist nicht als Vergleichsstudie angelegt. Bei einer Vergleichsstudie handelt es sich um ein Design, bei dem Variablen kontrolliert variiert werden, so dass die Auswirkungen quantitativ erfasst werden können, während alle anderen Bedingungen im Idealfall konstant bleiben (Kromrey 1985 S. 314, Bortz & Döring 1995 S. 493-494, Friedrichs 1990 S. 333-352). Vorausgesetzt ist dabei eine Erhebungssituation, in der mögliche Einflussgrößen auf die untersuchten Variablen ausgeblendet werden. Das Problem liegt in der Auswahl der Kontroll- und Experimentalgruppen. Die Untersuchungsbefunde in einer Vergleichsstudie sind nur dann valide, wenn sich die Teilnehmer der Experimental – und Kontrollgruppen in der Verteilung der Merkmale weitgehend gleichen. Lernmotivation, Interesse, sozialer Hintergrund und Vorwissen sind nur einige Variablen, die bei den Schülergruppen in einer Vergleichsstudie gleich verteilt sein müssten. An die in der Untersuchung eingebundene Lehrerguppe sind ähnliche Anforderungen zu stellen. Auch sie müssten gemeinsame Persönlichkeitsvariablen besitzen (vgl. Fischler 1996 S. 383). Nach Einschätzung von Kromrey (2000 S. 503) lassen sich die nicht kontrollierbaren Einflüsse auf die abhängige Variable kaum auf ein zu vernachlässigendes Minimum reduzieren. Will man dennoch am Design einer Vergleichsstudie festhalten, die sich am klassischen naturwissenschaftlichen Experiment orientiert, bietet es sich nur an, die personengebundenen Störvariablen statistisch auszuschalten. Die zufällige Auswahl der Experimental- und Kontrollgruppen gewährleistet bei ausreichender Stichprobengröße, dass alle für die Untersuchung potenziell relevanten Variablen in beiden Gruppen annähernd gleich ausgeprägt sind, so dass statistisch gesehen sich die personen- und gruppenbezogenen Störvariablen ausgleichen. Um zu einer hinreichenden Messgenauigkeit zu gelangen, muss die Stichprobengröße vertretbar und die Auswahl repräsentativ sein. Das wiederum ist in der gegenwärtigen Erhebungssituation nicht gewährleistet. Der Kenntnisstand über Änderungseffekte, die mit der Umsetzung der Neukonzeption *Chemie im Kontext* einher gehen, ist aus Sicht der Untersuchenden nicht hinreichend. Ein profunder Kenntnisstand ist aber nötig, um für eine vergleichend quantifizierende Felduntersuchung unabdingbare Hypothesen zu bilden, die dann in repräsentativen und vertretbar große Stichproben untersucht werden können.

Die Befunde dieser Untersuchung tragen zu einer Bestandsaufnahme bei, in der verschiedene Variablen des Lehr – Lerngeschehens bestimmt werden, auf die sich die besondere Unterrichtsorganisation auswirkt. Darüber hinaus bietet die Ermittlung der Mittelwertsunterschiede die Möglichkeit, Hypothesen über Änderungseffekte zu bilden. Die mit dem erhobenen Datenmaterial durchgeführte Faktorenanalyse eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, erfasste Variablen zu bündeln und auf ihren gemeinsamen Aussagewert zu überprüfen. Da es sich in dieser Untersuchung um eine Fallanalyse handelt, sind die Befunde in ihrem Aussagewert eingeschränkt.

## 4.1 Einbettung des Forschungsproblems in einen adäquaten Bezugsrahmen

Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ fußt auf einer Lerntheorie, die einer moderaten konstruktivistischen Position folgt. Danach ist das Wissen ‚selbst konstruiert‘, d.h. Informationen werden wahrgenommen, in vorhandene Strukturen eingepasst, in ihrer Tauglichkeit überprüft und individuell je nach Befindlichkeit, Biographie und Vorwissen verarbeitet.

Die sozial-konstruktivistische Perspektive des *situierten* Lernens (Mandl et al. 1995 S. 5) betont die Situationen, in denen Lernprozesse stattfinden. Lernen wird aus dieser Perspektive als ein Prozess gesehen, bei dem individuelle, biographisch bedingte Faktoren des Lernenden mit situativen Komponenten in Wechselwirkung stehen. Unter den Faktoren, die den Lernprozess von außen bestimmen, sind Interaktionen mit anderen Personen gemeint, wie auch Kontexte, in die das Handeln eingebettet ist. Insbesondere für das naturwissenschaftliche Lernen wird gefordert, dass während des Lernprozesses ein Wechsel von Alltagskonzepten zu naturwissenschaftlichem Wissen angestrebt werden muss, wobei dem Konzeptwechsel für sich allein genommen für den allgemeinbildenden Unterricht keine herausragende Bedeutung zugemessen wird. Von weitreichender Bedeutung wird der Konzeptwechsel dann angesehen, wenn er dazu dient, Phänomene im Alltag umfassender und widerspruchsfreier zu erklären (vgl. Duit 1996 S. 157).

Aus der Perspektive des *situierten* Lernens wird betont, dass ein erfolgreicher Lernprozess folgende Qualifikationen erfüllt:

Die Ausgangsprobleme

- sind komplex und inhaltlich eingebettet,
- besitzen einen hohen Grad an Authentizität
- und sind damit für die Lernenden bedeutsam und lebensstauglich.

Die fachsystematischen Konzepte, die zur Klärung der Ausgangsprobleme dienen

- bauen auf Vorwissen auf,
- sind in ihren Aspekten horizontal und vertikal vernetzt
- und werden in einer Lernumgebung erarbeitet, die eigenverantwortliches Lernen im sozialen Austausch ermöglicht.

Aus konstruktivistischer Sicht werden Informationen zu Wissen verarbeitet, wenn sie relevant, nützlich, neu und anschlussfähig sind. Die vier Entscheidungen werden danach individuell getroffen. Das Gedächtnis übernimmt damit die Funktion einer Instanz, die angebotene Informationen prüft und bewertet. Widersprechen die mentalen Informationseinheiten dem Lernreiz von außen und gibt es für den Widerspruch keine Lösung, so können nach diesem Gedächtnismodell adäquatere Strukturen geschaffen werden und neue Funktionseinheiten erstellt werden. Dabei wird das Gedächtnis nicht mehr vorrangig als Informationsspeicher gesehen, der nach Bedarf abgerufen

wird. Aus der konstruktivistischen Perspektive ist Erinnern etwas, was in der Gegenwart stattfindet. Damit ist die Erinnerung mit einem Filter vergleichbar, der Neuigkeit und Relevanz selektiert, so dass Informationen als ‚bemerkenswert‘ zur Kenntnis genommen und mit vorhandenen kognitiven Schemata verknüpft werden.

Nach der Gedächtnistheorie von Engelkamp sind die in der Lernphase gelegten Gedächtnisspuren der Zugang zur Erinnerung. Diese kontextspezifischen Spuren verweisen auf die Schemata der gespeicherten Informationen, und sie erlauben eine Rekonstruktion. Dabei wird angenommen, dass entscheidend ist, wie gut verschiedene Gedächtnisspuren, die möglicherweise sogar auf ähnliche Inhalte verweisen, voneinander unterscheidbar sind. Damit ist die Unterscheidbarkeit der Gedächtnisspuren der Schlüssel zur Qualität der Behaltensleistung. Aus der kognitionspsychologischen Perspektive ist die nach außen gezeigte Wissenspräsentation subjektiv, also auf den einzelnen und seinen individuellen Lernprozess bezogen. Das Verstehen bedeutet danach, dass der einzelne ein verfügbares mentales Inventar besitzt. Gesucht wird jeweils nach der Konfiguration, auf die der Lernreiz passt. Da davon ausgegangen wird, dass der Kontext von zu lernenden Informationen immer mit gelernt wird und sich auch in entsprechenden Gedächtnisspuren niederschlägt, gelingt der Abruf eines spezifischen Informationstyps umso eher, je eher der Kontext dem der Lernphase entspricht. Je nach Informationsgehalt können die Informationen kontextualisiert oder dekontextualisiert sein. Aus der Theorie begründet sich die Annahme, dass die Behaltensleistung umso höher ist, wenn die im Kontext angesprochenen Gedächtnisspuren deutlich voneinander unterscheidbar sind und wenn der Lerner in der Lernphase relational gelernt hat.

Die Gestaltung der Lernumgebung für die Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ fußt auf den oben genannten Postulaten. Die inhaltliche Gestaltung der Unterrichtsorganisation knüpft an die Erfahrungen an, die wahrgenommen werden können, wenn der Aufenthalt von Menschen in extreme Höhen oder große Tiefen verlagert ist. Für die Lernenden besteht die Möglichkeit, am eigenen Körper die Reaktionen wahrzunehmen, die sich immer dann unwillkürlich einstellen, wenn der Umgebungsdruck geändert wird. In Lernstationen wird anhand von Simulationsexperimenten überprüft und erarbeitet, welche Ereignisketten sich im Körper einstellen, wenn ein Parameter, der die Atemfrequenz beeinflusst, sich ändert.

Die Unterrichtsorganisation erfolgt in einem vierphasigen Lernzyklus, um

- die Veränderung der Atmung mit entsprechenden Folgen unter extremen Bedingungen entweder an sich selbst oder von anderen zu erfahren,
- die Wahrnehmung in Sprache und damit in Fragen umzusetzen,
- die Fragen relativ selbständig in Lernstationen zu bearbeiten,
- und das dadurch erworbene Wissen zu vertiefen und zu vernetzen.

## 4.2 Die Erhebungsmethoden

Untersucht werden soll, ob die besondere Unterrichtsorganisation die Einschätzungen der Schülerinnen und Schüler zum Fach Chemie positiv beeinflusst und Auswirkungen auf die Behaltensleistung hat. Als eine Erhebungsmethode für die Überprüfung der Behaltensleistung wird das Concept-Mapping gewählt. Concept-Mapping wird als Strukturierungshilfe des abzurufenden Hintergrundwissens angesehen, die besonders geeignet ist, relationales Wissen zu präsentieren. Studien von Eckert konnten nachweisen, dass das Verfahren selbst kaum einen Einfluss auf die Behaltensleistung hat (Eckert 1998 S. 118, S.125 –126). Damit wird der Einwand der Forschergruppen entkräftet (vgl. Schecker & Kliene 2000, Liu & Hinchey 1996, Stoddard, Abrams, Gasper & Canady 2000), die meinen, dass die Messung selbst reaktiv sei und damit das beeinflusse, was gemessen werden solle. Die zweite Erhebungsmethode ist ein Leistungstest, der einer üblichen Klausur sehr ähnlich ist. Der Leistungstest wird in einer Probandengruppe ungefähr ein halbes Jahr nach der Lernphase geschrieben.

Untersucht werden soll nicht nur die Behaltensleistung sondern auch, ob sich die Einschätzung der Schüler bezüglich ihrer Motivation, ihres Interesses, ihrer Akzeptanz der aktuellen Lernsituation und ihrer Selbständigkeit ändert. Um Änderungstendenzen in den Einschätzungen der Schüler festzustellen, die im Zusammenhang mit der besonderen Unterrichtsorganisation des Kontextes ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ stehen, wird eine Befragung durchgeführt. Es handelt sich dabei um zwei Fragebögen. Der Fragebogen I zum Chemieunterricht (vgl. Anhang F 7) wurde vor Beginn der Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ beantwortet und wird im Kapitel 4.3.4 ‚Befunde zu Änderungseffekten‘ ausgewertet. Der Fragebogen II zur Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ (vgl. Anhang F 2) folgte direkt im Anschluss an den Lernzyklus. Beide Fragebögen wurden von 46 Probanden aus drei unterschiedlichen Kursen bearbeitet. Die Befragten aus der Gruppe HOF und der Gruppe KSN sind Leistungskursschüler. Der Kurs WLK ist ein gemischter Grund- und Leistungsfachkurs. Von den sechzehn Befragten aus der Gruppe WLK sind sechs Leistungskursschüler und zehn Grundkursschülerinnen (vgl. Anhang F 11).

### 4.3 Befragung mit Fragebögen

Der Fragebogen II enthält 62 vorgegebene Items. Es werden positive und negative Items formuliert. Ein positiv formuliertes Item zum aktualisierten Interesse am Lernstoff ist beispielsweise das Item: 'Der Chemieunterricht hat mir Spaß gemacht'. 'Der Chemieunterricht zu diesem Thema war mir meistens egal' ist die entsprechende negative Formulierung. Die unterschiedlichen Skalenrichtungen dienen dazu, den häufig beobachteten Zustimmungstendenzen<sup>24</sup> bei den Befragten entgegenzuwirken.

#### Antwortskala

Den Befragten wird die Möglichkeit eingeräumt, die Zustimmung bzw. Ablehnung des Items in abgestufter Form vorzunehmen. Das Spektrum reicht über fünf Stufen, von 'stimmt völlig' bis 'stimmt gar nicht'. Es werden fünf Antwortalternativen vorgegeben: 'stimmt völlig', 'stimmt überwiegend', 'stimmt teils/teils', 'stimmt eher nicht', 'stimmt gar nicht'. Die Zahlenzuordnung zu den Antwortalternativen erfolgt so, dass ähnlich wie bei Schulnoten die stärkste Ablehnung den höchsten Zahlenwert erhält. Der Antwort 'stimmt gar nicht' wird bei allen Aussagen der Zahlenwert 5, der Antwort 'stimmt völlig' der Zahlenwert 1 und den dazwischenliegenden Abstufungen werden die Zahlen 2 bis 4 zugeordnet.

#### Statistische, hypothesenprüfende Untersuchungen<sup>25</sup>

Als hypothesenprüfende Untersuchungen werden im Rahmen dieser Befragung drei statistische Analysen gewählt: die Korrelationsanalyse, die Faktorenanalyse und als Signifikanztest der t – Test. Dabei ist jede Untersuchung daraufhin zu überprüfen, ob die Art der Untersuchungsanlage schlüssige Interpretationen zulässt. Wird beispielsweise der Zusammenhang zweier Variablen getestet, die die Lernmotivation bestimmen, und verweist der Korrelationsfaktor auf einen signifikanten Zusammenhang, so lässt sich nur darauf schließen, dass eine hohe Ausprägung der einen Variablen mit einer hohen Ausprägung der anderen Variablen einher geht. Gegenläufig zeigt sich der Zusammenhang bei einem negativen Wert des Korrelationsfaktors. Bei einem signifikanten Zusammenhang zweier Variablen, der quantitativ mit einem negativen Wert des Korrelationsfaktors beschrieben wird, geht eine hohe Ausprägung der einen Variablen mit einer geringen Ausprägung der anderen Variablen einher.

Beziehen sich die getesteten Zusammenhänge nicht auf zwei Einflussgrößen sondern auf viele, die unterschiedlich hohe Korrelationen untereinander aufweisen, so fasst die Faktorenanalyse die Einflussgrößen, die hohe Korrelationen untereinander aufweisen, zu einem latenten Faktor zusammen,

---

<sup>24</sup> Unter Zustimmungstendenzen wird die Neigung der Befragten verstanden, Aussagen ohne Berücksichtigung ihres Inhalts zuzustimmen (Gehring 2000 S. 36).

<sup>25</sup> Hypothesenprüfende Untersuchungen testen Annahmen über Zusammenhänge, Unterschiede und Veränderungen ausgewählter Merkmale bestimmter Gruppen. (Bortz 1995 S. 459, 463 – 466, 470 – 483)

der das Gemeinsame der miteinander korrelierenden Einflussgrößen vereint. Der Faktor entspricht damit einer Variablen, die konstruiert wird und die so hoch wie möglich mit den anderen Variablen korreliert. Damit erfüllt die Faktorenanalyse zwei Funktionen: Da sie die Einflussgrößen bündelt und auf einen Faktor vereint, reduziert sie Daten. Sie regt darüber hinaus dazu an, das Gemeinsame der gebündelten Einflussgrößen zu deuten. Da ebenso wie die Korrelationsanalyse auch die Faktorenanalyse ein mathematisches Beschreibungsmodell ist, sind viele Interpretationen gleichberechtigt möglich. Welche Interpretation gewählt wird, hängt von der Perspektive ab, die der Deutende hat (vgl. Bortz & Döring 1995 S. 355).

Der Testwert  $t$  ist ein statistischer Kennwert, der den Unterschied der Mittelwerte in zwei Datensätzen statistisch absichert. Bei einem Datensatz von 46, wie er in dieser Untersuchung vorliegt, beträgt der  $t$  – Wert 1,7 (Bortz 1993 S. 701, 1997 S. 775). Das heißt, der  $t$  – Wert muss mindestens 1,7 betragen, um mit 95 %iger Sicherheit sagen zu können, dass die Mittelwerte der miteinander verglichenen Datensätze sich signifikant voneinander unterscheiden und die Unterschiede nicht zufallsbedingt sind. Liegt der  $t$ - Wert bei einem Datensatz von 46 unter der kritischen Grenze von 1,7 heißt das, dass die ermittelten Unterschiede zufallsbedingt sein können, es aber nicht müssen.

#### **4.3.1 Anforderungen der Befragung an klassische Gütekriterien**

Die Qualität einer Fragebogenuntersuchung lässt sich an den drei zentralen Kriterien der Testgüte festmachen. Die klassischen Gütekriterien Objektivität<sup>26</sup>, Reliabilität<sup>27</sup> und Validität<sup>28</sup> werden auf ihre Relevanz hin untersucht.

##### *Objektivität*

Die Fragebogenuntersuchung ist dann objektiv, wenn verschiedene Testanwender bei den gleichen Personen zu den gleichen Ergebnissen kommen. In dieser Untersuchung ist eine hinreichende Objektivität gewährleistet, da der Zeitpunkt der Befragung, die Durchführung und die Datenaufbereitung festgelegt sind. Die erste Befragung erfolgt vor Beginn des Lernzyklus, die zweite Befragung am Ende des Lernzyklus. Die Befragungen selbst erfolgen individuell. Jede Versuchsperson benutzt eine Codierungsnummer, die auf beide Fragebögen eingetragen wird. Die Datenaufbereitung erfolgt durch das Statistikprogramm automatisch.

---

<sup>26</sup> „Die Objektivität eines Tests gibt an, in welchem Ausmaß die Testergebnisse vom Testanwender unabhängig sind“ (Bortz 1995 S. 180).

<sup>27</sup> „Die Reliabilität eines Tests kennzeichnet den Grad der Genauigkeit, mit dem das geprüfte Merkmal gemessen wird“ (Bortz 1995 S.181).

<sup>28</sup> „Die Validität eines Tests gibt an, wie gut der Test in der Lage ist, genau das zu messen, was er zu messen vorgibt“ (Bortz 1995 S.185).

### *Reliabilität*

Die Reliabilität gibt die Zuverlässigkeit der Messwerte an und macht damit eine Aussage über die Messgenauigkeit. Die Messung ist dann reliabel, wenn wiederholte Messungen mit dem gleichen Instrument zu dem gleichen Ergebnis führen. Im Rahmen dieser Untersuchung geht es um den Vergleich von Mittelwerten, t - Werten und Korrelationsfaktoren. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erhalten, ist es günstig eine geringe Standardabweichung innerhalb einer Gruppe zu haben. Ist die Gruppe heterogener, so lassen sich zufällige Fehler, die unsystematisch sind und von Messwert zu Messwert ungerichtet variieren, durch die Vergrößerung des Stichprobenumfangs ausgleichen. Die Anzahl der Teilnehmer in dieser Untersuchung ist nach Literaturangaben (Bortz 1995 S. 649, S. 70, S. 575) hinreichend. Es handelt sich um ein Gruppe von 46 Teilnehmern.

### *Validität*

Die Validität einer Messung bezieht sich auf die Frage, ob das, was gemessen werden soll, auch gemessen wird. Die Gültigkeit einer Messung setzt ihre Zuverlässigkeit voraus. Auch wenn der Stichprobenumfang hinreichend ist, sind Validitätsmängel, die auf Zufallsfehlern beruhen, nicht ausgeschlossen (vgl. Bortz & Döring 1995 S. 477- 478).

Eingeschränkt wird die Validität in dieser Untersuchung durch folgende Einflussgrößen:

1. Die Teilnehmer dieser Untersuchung sind nicht repräsentativ für Schüler des 12. Jahrganges mit dem Fach Chemie. Es sind überwiegend Schüler und Schülerinnen, die einen Leistungskurs Chemie besuchen. Untersuchungen legen nahe, dass Schüler, die das Leistungsfach Chemie wählen, sich stärker von ihren fachlichen Interessen leiten lassen (Roeder 1989 S. 119-142, Eilers 1987 S. 247-266, Bargel, Framheim & Sandberger 1989, zitiert in Krapp 1996 S. 60).
2. Es handelt sich in dieser Untersuchung nicht um eine Zufallsstichprobe. Unkontrolliert ist der Einfluss von Persönlichkeitsvariablen der beteiligten Schüler und Lehrer. Die Befunde sind damit auf das beschriebene Erhebungsverfahren und auf die ausgewählte Zielgruppe beschränkt.
3. Der Änderungseffekt, der durch den Mittelwertevergleich gemessen wird, ist an unterschiedliche Voraussetzungen geknüpft. Der Unterricht, der in den drei Leistungskursen vor dem Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ stattgefunden hat, unterschied sich nicht nur in allen drei Untersuchungsgruppen, sondern auch bei den einzelnen Teilnehmern. Die Leistungskurse haben im Jahrgang 12 begonnen, und der vorangegangene Chemieunterricht in Klasse 11 fand im Klassenverband statt. Damit waren die Gruppenzusammensetzungen in Klasse 11 und die Lehrer für die Untersuchungsteilnehmer

unterschiedlich, so dass vermischte Effekte den gemessenen Änderungseffekt beeinflusst haben können.

4. Die Untersuchungsgruppe WLK ist ein gemischter Kurs mit Grund- und Leistungsfachschülern. Die Grundfachschüler hatten drei Unterrichtsstunden pro Woche, die Leistungsfachschüler fünf Stunden. Das Splitten des Lernangebotes ist in der Regel mit zusätzlichen Einflüssen gekoppelt, die die Validität einschränken.

Damit haben die in dieser Untersuchung erzielten Ergebnisse für die Untersuchungsgruppe ihre interne Gültigkeit. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse über die untersuchten Personen hinaus ist eingeschränkt.

#### **4.3.2 Befunde aus der Mittelwertanalyse**

Die im Fragebogen vorgegebenen Items sind in acht Gruppen eingeteilt. Die Sortierung erfolgt nach Erlebnisqualitäten, die aus der Perspektive der Interessen- und Motivationsforschung bedeutsam sind (Krapp 1996 S. 51, Gräber 1992, Häußler 1995a, zitiert in Häußler 1998 S. 125). Aus der Gesamtzahl der Items werden nur diejenigen ausgewählt, deren Beantwortung eine Aussage über Zustimmung oder Ablehnung ermöglichen.

Folgender Sortierungsschlüssel wird gewählt:

- Autonomieempfinden
- Kompetenzermpfinden
- Aktualisiertes Interesse am Lernstoff
- Persönliche Bedeutsamkeit des Lernstoffs
- Einschätzung des Vorwissens
- Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Lernanforderung
- Einschätzung der Arbeit in den Lernstationen
- Akzeptanz der Experimente und Materialien

In der Auswertung werden die Häufigkeiten und die Mittelwerte der Antworten verglichen<sup>29</sup>. Vom Programm automatisch vorgegeben sind drei Mittelwerte und zwei Streuungsparameter. Bei den Mittelwerten handelt es sich um das arithmetische Mittel, den Median und den Modalwert, bei den Streuungsparametern um die Varianz und die Standardabweichung. Zum Vergleich herangezogen wird das arithmetische Mittel und die Standardabweichung.

---

<sup>29</sup> Genutzt wird die Statistik - Software SPSS

## Autonomieempfinden

Tabelle 26: Autonomieempfinden (vgl. Anhang F 12 bis F 17)

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$ <sup>30</sup>	s <sup>31</sup>	Median
35	Ich konnte kaum eigene Ideen und Vorschläge einbringen. Die Stunden waren immer fertig geplant.	12%	19%	69%	3,8	1,1	4
41	Wir haben selbständiger gearbeitet als sonst.	80%	18%	2%	1,9	0,75	2
47	Mir hat die Arbeit an den Lernstationen genügend Freiraum gegeben, mein Wissen zu erweitern und zu vertiefen.	61%	3%	36%	2,3	0,86	2
63	Durch die Vorgaben fühlte ich mich in meinem eigenen Denkwegen eingeschränkt.	22%	1%	77%	4,1	0,8	4

### Teilauswertung zum Faktor ‚Autonomieempfinden‘:

Item 35 und Item 63 werden eher ablehnend beantwortet, Item 41 und Item 47 eher zustimmend. Die Schüler nehmen sich in der Lernsituation eher selbstbestimmt wahr.

- 80% der Befragten bestätigten, dass sie selbständiger gearbeitet haben als sonst (Item 41).
- 77% der Befragten verneinten, dass sie durch die Vorgaben in ihren eigenen Denkwegen eingeschränkt worden sind (Item 63).
- 69% meinten, dass sie genügend Freiraum hatten, eigene Ideen zu entwickeln (Item 35).
- 61% der Befragten fühlten sich durch die Gruppenarbeit nicht in ihrem eigenen Lernprozess behindert (Item 47). Dagegen bestätigten 36% der Befragten, dass sie sich durch die Gruppenarbeit in ihrem individuellen Lernprozess gestört fühlten.

## Kompetenzempfinden

Tabelle 27: Kompetenzempfinden (vgl. Anhang F 12 bis F 17)

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
16	Ich habe schon früh den Anschluss im Unterricht verloren.	6%	15%	79%	4,2	0,97	4
44	Ich würde mir nicht zutrauen, im Chemieunterricht auch zu anderen Themen selbständig zu arbeiten.	30%	1%	69%	3,96	0,86	4
45	Ich traue mir zu, später einen Beruf auszuüben, für den man Chemiekennnisse benötigt.	69%	21%	10%	2,2	1,0	2
47	Mir hat die Arbeit in den Lernstationen genügend Freiraum gegeben, mein Wissen zu erweitern und zu vertiefen.	62%	28%	8% <sup>32</sup>	2,3	0,9	2

<sup>30</sup> arithmetisches Mittel (gerundet)

<sup>31</sup> Standardabweichung (gerundet)

<sup>32</sup> Das Item wurde nur von 45 Befragten beantwortet.

*Teilauswertung zum Faktor ‚Kompetenzempfinden‘:*

Item 16 und Item 44 werden eher ablehnend beantwortet. Die Schüler fühlten sich in der Lernsituation eher kompetent.

- 69% der Befragten hatten so viel Selbstvertrauen, dass sie sich zutrauen, auch zu anderen Themen selbständig zu arbeiten (Item 44).
- 6% der Befragten bestätigten, dass sie den Anschluss im Unterricht verloren haben (Item 16).

Eher zustimmend beantwortet wird das Itempaar 45/46.

- 69% der Befragten konnten sich vorstellen, später einen Beruf auszuüben, der chemische Kenntnisse verlangt.
- Nur 8% meinten, dass die Arbeit in den Lernstationen eher nicht zu ihrer Kompetenzerweiterung beigetragen habe.

***Aktualisiertes Interesse am Lernstoff***

**Tabelle 28: Aktualisiertes Interesse am Lernstoff (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
7	Ich finde es interessant, wenn ich die Folgen meiner erhöhte Atemfrequenz mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen erklären kann.	62%	23%	15%	2,2	1,1	2
18	Ich fand das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ uninteressant.	8%	17%	75%	4,2	0,8	4
23	In diesem Unterricht war ich mit meinen Gedanken häufig woanders.	21%	2%	77%	3,9	0,7	4
21	Der Schnupperkurs ‚Tauchen‘ war für mich eine gelungene Ergänzung, denn ich konnte an mir selbst unterschiedliches Atmen unter nicht alltäglichen Bedingungen wahrnehmen.	75%	16%	6%	2,0 <sup>33</sup>	1,0	2

*Teilauswertung zum Faktor ‚Aktualisiertes Interesse am Lernstoff‘:*

Item 18 und Item 23 werden eher ablehnend beantwortet, Item 7 und Item 21 eher zustimmend. Der Lernstoff hatte bei der überwiegenden Anzahl der Schüler Interesse hervorgerufen.

- 8% der Befragten fand das Thema uninteressant (Item 18).
- 62% der Befragten bestätigten, dass sie es interessant finden, ein Phänomen fachkompetent zu erklären (Item 7).
- 77% der Befragten fühlten sich während des Unterrichts aktiv und engagiert (Item 23).
- 75% der Befragten bewerteten den Schnupperkurs positiv und hielten ihn für eine gelungene Ergänzung (Item 21), die Interesse geweckt hat.

<sup>33</sup> Das Item wurde von vier der Befragten nicht beantwortet.

## Persönliche Bedeutsamkeit des Lernstoffs

**Tabelle 29: Persönliche Bedeutsamkeit des Lernstoffes (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
10	In diesem Unterricht lernten wir nicht die Chemie, die für mich wichtig ist.	8%	35%	57%	3,8	1,03	4
12	Diese Kenntnisse sind nur für Mediziner wichtig.	6%	17%	77%	4,04	0,93	4
14	Ich habe Fragen zu diesem Thema, allerdings haben wir genau diese Inhalte nicht behandelt.	2%	12%	86%	4,2	0,7	4
29	Der Chemieunterricht zu diesem Thema war mir meistens egal.	23%	2%	75%	4,1	0,84	4
3	Für mich ist es wichtig, die Ursachen der Beschwerden nach Tauchunfällen zu verstehen, da ich dadurch die Risiken besser einschätzen lerne.	84%	10%	6%	1,9	0,95	2

Teilauswertung zum Faktor ‚Persönliche Bedeutsamkeit des Lernstoffes‘:

Item 10, 12, 14 und 29 werden ablehnend beantwortet, Item 3 zustimmend. In den fünf Items wird nach der Bedeutsamkeit des Lernstoffes für das eigene Körperverständnis gefragt.

- Für 84% der Schüler war der Körperbezug des Lerninhalts bedeutsam (Item 3).
- 23% der Befragten fühlten sich vom Lerngegenstand kaum angesprochen (Item 29).
- Unwichtig schätzten 8% der Befragten die chemischen Kenntnisse ein, die sie im Lernzyklus erworben hatten (Item 10).
- 77% der Befragten verneinten, dass es sich beim Lerninhalt um ein Spezialwissen gehandelt hat, das nur für Mediziner Bedeutung besitzt (Item 12).
- Für 86% der Befragten war das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erschöpfend behandelt worden, so dass keine Fragen unbeantwortet blieben (Item 14).

## Einschätzung des Vorwissens

**Tabelle 30: Einschätzung des Vorwissens (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$ <sup>34</sup>	s <sup>35</sup>	Median
1	Meine Kenntnisse über das Tauchen wurden in keinen neuen Zusammenhang gestellt.	6%	13%	81%	4,2	0,85	4
2	Ich habe vorher viel über das Tauchen gewusst.	6%	14%	80%	3,98	0,94	4
4	Störungen von Löslichkeitsgleichgewichten und Beschwerden nach Tauchunfällen stehen für mich in einem Erklärungszusammenhang, den ich für mich neu erschlossen habe.	77%	15%	8%	2,02	0,95	2
9	Bekannt war mir, dass ich hyperventiliere, wenn mein Säure – Base – Haushalt gestört ist.	10%	13%	77%	4,2	1,07	5
8	Dass ich mein Gehirn dazu überlisten kann, meine Atmung zu unterdrücken, wenn ich	79%	11%	10%	1,9	1,13	2

<sup>34</sup> arithmetisches Mittel (gerundet)

<sup>35</sup> Standardabweichung (gerundet)

	hyperventiliere und damit meinen pH – Wert im Blut erhöhe, war mir vorher nicht bekannt.						
--	--	--	--	--	--	--	--

*Teilauswertung zum Faktor ‚Einschätzung des Vorwissens‘:*

Ablehnend beantwortet werden die Items 1, 2 und 9, zustimmend die Items 4 und 8. Das Vorwissen über die Veränderungen im Säure – Base - Haushalt des Körpers, wenn man taucht oder hyperventiliert, war zu Beginn der Lernsituation gering.

- Für 80% der Befragten waren die erworbenen Kenntnisse über das Tauchen neu (Item 1, Item 2).
- 77% der Befragten bestätigten, dass ihnen die Zusammenhänge von Lösungsgleichgewichten und körperlichen Beschwerden nicht bekannt waren (Item 4).
- Neu war den Schülern offensichtlich auch der kausale Zusammenhang zwischen einer bewusst hervorgerufenen Hyperventilation und einer Alkalose. Nur 10% der Befragten bestätigten, dass ihnen der Zusammenhang bekannt war (Item 9 und Item 8).

***Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Lernanforderung***

**Tabelle 31: Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Lernanforderung (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
61	Ich empfand das Anspruchsniveau der Aufgaben in den Lernstationen nicht angemessen.	2%	25%	73%	3,9	0,71	4
47	Mir hat die Arbeit an den Lernstationen genügend Freiraum gegeben, mein Wissen zu erweitern und zu vertiefen.	61%	28%	8%	2,3 <sup>36</sup>	0,9	2
16	Ich habe schon früh den Anschluss im Unterricht verloren.	7%	13%	80%	4,2	1,0	4
17	Der Chemieunterricht war logisch strukturiert, die Themen bauten sich für mich nachvollziehbar aufeinander auf.	57%	26%	17%	2,4	1	2

*Teilauswertung zum Faktor ‚Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Lernanforderung‘:*

Eher ablehnend beantwortet wurden Item 61 und 16, zustimmend hingegen das Itempaar 47 und 17. Das Anspruchsniveau der Aufgaben in den Lernstationen wurde im Durchschnitt als angemessen angesehen.

- Nur 2% empfanden das Anspruchsniveau unangemessen (Item 61).
- Für nahezu zwei Drittel der Befragten war der Schwierigkeitsgrad passend (Item 47).
- Für 57% war es einfach, die vernetzten Strukturen der fachlichen Inhalte zu erkennen (Item 16).
- Nur 7% fühlten sich nach eigener Einschätzung überfordert (Item 16).

<sup>36</sup> Die Frage wurde von 45 der Befragten beantwortet.

### ***Einschätzung der Arbeit in den Lernstationen***

**Tabelle 32: Einschätzung der Arbeit in den Lernstationen (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
49	Durch die Beiträge der anderen Schüler lernte ich kaum etwas.	20%	18%	62%	3,6	1,04	4
50	Aus meiner Sicht bietet das Unterrichtsgespräch wenig Möglichkeiten, selbständiges Lernen zu fördern.	10%	30%	60%	3,5	0,90	4
53	In der Gruppenarbeit fühlte ich mich in der Entwicklung meiner eigenen Ideen behindert.	19%	1%	80%	3,98	0,9	4
51	Ich fühle mich zufriedener, wenn ich eigenständig einen Sachverhalt erschlossen habe.	62%	24%	13%	2,2	1,0	2

*Teilauswertung zum Faktor 'Einschätzung der Arbeit in den Lernstationen':*

Die Items 49, 50 und 53 werden ablehnend beantwortet, das Item 51 zustimmend.

- 20% der Schüler waren der Meinung, dass sie von anderen Schülern kaum etwas gelernt haben (Item 49).
- 19 % der Befragten fühlten sich durch die Gruppenarbeit behindert (Item 53).
- Nach Einschätzung von 80% der Schüler bot die Gruppenarbeit genügenden Freiraum zur eigenen Ideenentwicklung und zum selbständigen Lernen (Item 53).
- 62% der Befragten fühlten sich zufrieden beim eigenständigen Lernen (Item 51).
- Das Unterrichtsgespräch wurde von 60% der Befragten als angemessene Methode angesehen, die selbständiges Lernen förderte (Item 50).

### **Akzeptanz der Experimente und Materialien**

**Tabelle 33: Akzeptanz der Experimente und Materialien (vgl. Anhang F 12 bis F 17)**

Nr.	Item	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
57	Die Versuchsvorschriften waren eindeutig.	71%	25%	4%	2,0	0,85	2
58	Die Anzahl der Experimente war im Vergleich zum theoretischen Teil zu gering.	2%	16%	82%	4,00	0,66	4
59	Gefallen hat mir, dass die experimentellen Aufgaben mit dem Thema der Lernstation im eindeutigen Zusammenhang stand.	71%	29%	0%	2,1	0,7	2
63	Durch die Vorgaben fühlte ich mich in meinen eigenen Denkwegen eingeschränkt.	2%	20%	77%	4,1	0,8	4

*Teilauswertung zum Faktor Akzeptanz der Experimente und Materialien:*

Item 57 und Item 59 werden zustimmend, Item 58 und Item ablehnend beantwortet.

- Die Versuchsvorschriften waren für die überwiegende Anzahl der Schüler eindeutig. 71% der Befragten bestätigen das (Item 57).

- 82% hielten die Anzahl der Experimente für angemessen (Item 58).
- Positiv aufgefallen war 71% der Befragten, dass die Phänomene und Experimente im eindeutigen Zusammenhang standen (Item 59).
- Nur 2% fühlten sich durch die Vorgaben eingeschränkt (Item 63).

### ***Offene Statements***

Im Anschluss an die Items wird im Fragebogen erfragt, ob das Thema den jeweiligen Vorstellungen von einem Chemieunterricht entsprach. Für 76% der Schüler entsprach das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ den Vorstellungen, die sie über einen Chemieunterricht haben. Sie kreuzten die Frage ‚Entsprach dieses Thema Ihren Vorstellungen von Chemieunterricht mit ‚Ja‘ an. 29 Schüler begründeten ihre Antwort. Sie verwiesen auf den hohen experimentellen Anteil und die Fragestellungen, die interdisziplinär, biochemisch und mit hohem Neuigkeitsgrad verbundenen waren (siehe Anhang F 13, F14 und F 17).

Der Fragebogen II enthält vier offene Fragen. In Nr. 22 gibt es die Möglichkeit, sich frei über die Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zu äußern. Wahrgenommen wurde dies von dreizehn Schülern (siehe Anhang F 13, F14 und F 17). Fünf Schüler verwiesen auf das verlangte physikalische Wissen, das nach ihrer Meinung schwer verständlich war und einen zu hohen Anteil in der Unterrichtseinheit einnahm. Die fünf Befragten sind Grundkursschüler aus der Gruppe WLK (Codierung: KARA, REND, HEJO, IRGE, SOMA, siehe Anhang F 11).

Fünf weitere Äußerungen verdeutlichen ein Sicherheitsbedürfnis, das nicht zufriedengestellt worden ist. Beklagte Mängel wie „kein Bucheinsatz“ (Codierung: SIMA), „zu wenige Unterrichtsbesprechungen“ (Codierung: MSJ07), „zu viel Stationenarbeit“ (Codierung MAUW), sowie „fehlende Strukturierung“ (Codierung: CLRO) zeigen, dass dem Wunsch nach mehr Sicherheit im Lernstoff nachgegangen werden muss. Die Codierungen verweisen darauf, dass es sich um Äußerungen von Leistungskursschüler handelt (siehe Anhang F 11).

Nr. 33 bietet die zweite Möglichkeit sich in offener Form zu äußern. Zehn Einschätzungen und Wünsche liegen vor. Ein Schüler nutzte die Möglichkeit, sich negativ über den unterrichtenden Lehrer zu äußern. Zwei Äußerungen verdeutlichten die hohe Akzeptanz der Unterrichtsorganisation. Eine Äußerung beklagte die Bewertung der Langzeithausaufgabe, zwei weitere den fehlenden Leitfaden während der Unterrichtseinheit. Mehrfach wurde darauf verwiesen, dass die Internetadressen nicht mehr aufrufbar waren.

Nr. 56 bietet die Möglichkeit, sich über die Gruppenarbeit zu äußern. Wahrgenommen wurde dies von acht Schülern. Zwei Schüler äußerten sich dazu positiv. In vier Äußerungen wird eine Fehlentwicklung, die häufig mit der Gruppenarbeit verknüpft ist, deutlich. Bemängelt wurde vorwiegend der unterschiedliche Einsatz der einzelnen Gruppenmitglieder.

Die offene Frage Nr. 66 bezieht sich auf die verwendeten Medien. Alle zwanzig Äußerungen verweisen auf die veralteten Internetadressen.

24% der Schüler kreuzten die Frage ‚Entsprach dieses Thema Ihren Vorstellungen von Chemieunterricht?‘ mit ‚Nein‘ an. Als Grund wurde mehrfach (viermal) die physikalische Ausrichtung des Themas genannt. Weitere Gründe bezogen sich auf das Orientierungsbedürfnis der einzelnen Probanden. Aussagen wie „zu wenig richtig gelernt“ oder „weil ich andere Chemie gewohnt bin“ oder „weil die Struktur nicht immer erkennbar war“ verdeutlichen, dass der Wunsch nach einem adäquaten didaktischen Sicherheitsnetz besteht.

### ***Zusammenfassung der Teilergebnisse***

Für 76% der Schüler entsprach das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ den Vorstellungen, die sie über einen Chemieunterricht haben. Sie kreuzten die Frage ‚Entsprach dieses Thema Ihren Vorstellungen von Chemieunterricht?‘ mit ‚Ja‘ an.

Die Akzeptanz der Unterrichtsorganisation zeigt sich in folgenden, zusammenfassenden Aussagen zur Unterrichtseinheit, die sich aus der Auswertung des Fragebogens II zur Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ergeben (siehe Anhang F12 – F 17):

Die Mehrzahl der Befragten äußern sich eher zustimmend zu folgenden Aussagen:

- Das Phänomen der Hyperventilation mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen erklären zu können, ist interessant, bedeutsam und hilfreich (Item 10, Item 12, Item 14, Item 29, Item 3, Item 7, Item 18, Item 23, Item 21).
- Die Experimente sind in angemessener Anzahl, sie sind eindeutig dokumentiert und stehen im Zusammenhang mit den zu erklärenden Phänomenen. Die Vorgaben lassen genügend Raum für eigene kreative Ansätze (Item 57, Item 58, Item 59, Item 63).
- Der Schwierigkeitsgrad der zu lösenden Aufgaben ist angemessen (Item 61, Item 47, Item 16 und Item 17).
- Der Neuigkeitsgrad des Lerninhalts ist hoch, das Vorwissen dementsprechend gering (Item 1, Item 2, Item 4, Item 9, Item 8).
- Die Unterrichtsorganisation verstärkte das Gefühl, sich selbstbestimmt und kompetent wahrzunehmen (Item 35, Item 41, Item 47, Item 63, Item 16, Item 44, Item 45).
- Durch die Gruppenarbeit an den Lernstationen wird das selbständige Lernen ermöglicht und gefördert (Item 49, 53, 50, 51).

### ***Folgerungen aus den Befunden***

Es gibt eine Mehrheit der Schüler, die die besondere Lernprozessorganisation im Lernzyklus ‚Atmen unter Bedingungen‘ akzeptiert, positiv empfindet und sich selbst engagiert und kompetent

wahrnimmt. Der Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ist für 76% der Befragten persönlich bedeutsam und hilfreich. Der in Lernstationen organisierte Lernprozess wird mehrheitlich als Methode akzeptiert, die selbständiges Lernen ermöglicht und fördert. Das Gefühl, sich dabei selbstbestimmt wahrzunehmen, wird bei den meisten Schülern empfunden.

Eine verhältnismäßig kleine Minderheit fühlt sich unzufrieden. Eine LK - Schülerin begründet ihre Ablehnung ausführlich. Ihre Aussage verdeutlicht ihren Wunsch nach Orientierung im Lernen, der im eigenständigen und in einer Gruppe stattfindenden Lernprozess aus ihrer Sicht nicht erfüllt wird (Fragebogen Codierung MSJ07).

„Das Thema selbst war gut für den Chemieunterricht geeignet, unsere untypische Art den Unterricht zu gestalten hat mir jedoch nicht gut gefallen, da ich im ganz normalen, regelmäßig/gleichmäßigen Chemieunterricht besser weiß, woran ich bin. Außerdem möchte ich so grundlegende Dinge, wie man sie in der Schule in Naturwissenschaften noch lernt, lieber direkt lernen, wie sie ‚definitiv‘ richtig sind, als dass ich sie mir irgendwie selbst entwickelnd erarbeiten muss und sie mir dann auch noch nicht ganz richtig merke. Ich denke auch, dass man dann mehr Dinge lernen kann und somit eine bessere Grundlage für das eigenständige Arbeiten in den schwierigen Bereichen der Chemie bekommt“.

Zu Frage 33 ergänzt dieselbe Schülerin:

„Ich mag es nicht, wenn man andauernd versucht, aus dem Chemieunterricht etwas zu machen, was er eigentlich doch nicht ist. Ich persönlich kann mit Projekten und Exkursen in die Biologie oder Medizin oder auch einfach mit Unregelmäßigkeiten im Unterricht nicht gut umgehen und lasse mich dadurch leicht verwirren, verunsichern und daher auch demotivieren“.

Deutlich wird, dass selbständiges Lernen, das in einer Lernprozessorganisation gefördert werden sollen, unterschiedliche Zugangsweisen erfordert, da sich die persönlichen Voraussetzungen der Persönlichkeiten unterscheiden. Die Schülerin bevorzugt offensichtlich einen Lernstil, der schrittweise vorgeht, einer Absicherung bedarf und sich dann folgerichtig einem Gesamtverständnis annähert. Wird diesem Lernstil entsprochen, fühlt sie sich zufrieden und motiviert.

Darüber nachgedacht werden muss, welche Möglichkeiten es gibt, diesem Sicherheitsbedürfnis gerecht zu werden, ohne den Anspruch auf zu erwerbende Kompetenzen wie Selbständigkeit und Teamfähigkeit aufzugeben. Findet sich in der Arbeitsgruppe ein Lerner, der eher einen globalen, ganzheitlichen Ansatz verfolgt und sich in einem Gesamtverständnis orientiert, dann könnte im Idealfall durch sozialen Austausch das geleistet werden, was beiden Lerntypen hilft. Derjenige Lerner, der versucht den Überblick zu bewahren und mehrere Aspekte gleichzeitig überprüft, könnte immer wieder an den Bezug zum Konkreten erinnert und auf den soliden Boden der Tatsachen zurückgeholt werden. Derjenige Lerner, der bevorzugt auf Details achtet und das Gesamtverständnis sukzessive über Zwischenschritte anpeilt, könnte durch die Kommunikation angeregt werden, den Überblick und damit Sicherheit zu gewinnen. Voraussetzung dafür ist eine reibungsfreie Kommunikation in der Gruppe mit geringer Störanfälligkeit.

Ein weiterer Baustein im Sicherheitsnetz bietet eine adäquate multimediale Lernumgebung. Die Lernumgebung sollte ein operatives Wissen zur Verfügung stellen, das Lerner mit

unterschiedlichen Lernstilen zufrieden stellt. Sie sollte einerseits Entfaltungsmöglichkeiten bieten, die anregen, auch in komplexere Zusammenhänge vorzudringen. Andererseits sollte sie aber auch die Lernenden zufrieden stellen, die eher schrittweise lernen und daher verstärkt Orientierungshilfen benötigen. Ein Prototyp dieser Lernumgebung wurde für die Unterrichtsinhalte des Jahrganges 11 im Rahmen der CHIK – Konzeption von Krilla & Ralle (2001) entwickelt.

Positiv wird mehrheitlich das selbständige Lernen in Gruppen bewertet. Von einer Minderheit werden Fehlentwicklungen in der Gruppenarbeit beklagt. Genannt werden ungleiche Arbeitsverteilungen und nicht einsehbare Bewertungen. Um für die Zukunft die Effizienz der Gruppenarbeit zu fördern, ist es erforderlich, den Arbeitsprozess in der Gruppe so zu steuern, dass eine gleichmäßigere Arbeitsverteilung resultiert. Dazu könnte eine klare Aufgabenverteilung innerhalb der Gruppe beitragen. Die Verantwortung für die experimentelle Durchführung, für das Protokoll und für die Präsentation von Teilergebnissen sollte wechseln. Hilfreich für die Förderung der Gruppenarbeit könnte zusätzlich eine interne Gruppenevaluation mit einem geeigneten Fragebogen sein, der nach einer zeitlich begrenzten Arbeitsphase erfolgt.

### **4.3.3 Befunde aus der Korrelationsanalyse**

Voraussetzung für die Korrelationsberechnungen ist, dass einerseits die Items wie Variablen behandelt werden und andererseits für die Zahlen, die den Antworten zugeordnet werden, ein gleichgroßer Abstand wie auf einem Zahlenstrahl angenommen wird. Ein positiver Zusammenhang besagt, dass eine hohe Zustimmung zum einen Item mit einer hohen Zustimmung zum anderen Item einher geht. Bei einem negativen Zusammenhang zeigt sich eine gegenläufige Tendenz. Eine hohe Zustimmung zu einem Item geht mit einer hohen Ablehnung des anderen Items einher.

Je nach Stichprobenumfang sind Grenzen für die Werte des Korrelationskoeffizienten vereinbart, ab denen eine Korrelation noch als signifikant gilt. Für 40 Datensätze wird eine Signifikanzgrenze für den Korrelationskoeffizienten  $r$  von  $0,4^{37}$  angegeben. Für 60 Datensätze ist die Signifikanzgrenze für den Korrelationskoeffizienten  $r$  bei einem Wert von  $0,3$  (Bortz 1993 S. 701, 1999 S. 775). In der Auswertung werden die Korrelationen betrachtet, die größer als  $0,49$  sind.

Ist die Korrelation signifikant, sagt das für sich genommen nichts über einen kausalen Zusammenhang aus. Ausgesagt werden kann nur, dass bei Veränderung einer Variablen sich auch die andere gleichsinnig oder gegenläufig verändert (Bortz 1995 S. 483). In dieser Untersuchung werden 11 statistisch signifikante Korrelationen ausgewählt. Die Auswahl erfolgt nach Zusammenhängen, die zu dem in der Literatur veröffentlichten Forschungsmodell zur Lernmotivation (Krapp 1996 S. 43, S. 48, S. 54) kompatibel sind.

---

<sup>37</sup> Signifikanzgrenze für  $r$  gerundet

### Ausgewählte Korrelationen

In der Tabelle 34 sind für Item 13 und Item 10 Korrelationen aufgelistet, deren Korrelationskoeffizient  $r$  größer bzw. gleich fünf ist.

Tabelle 34: Ausgewählte Korrelationen (vgl. Anhang F 29 und F 31)

Item Nr.	Item	$\bar{x}$	s	Item Nr.	Item	$\bar{x}$ <sup>38</sup>	s <sup>39</sup>	$r$ <sup>40</sup>
13	Diese Chemiekennntnisse sind für mich bedeutsam.	2,6	1	17	Der Unterricht war für mich logisch strukturiert, die Themen bauten sich für mich nachvollziehbar aufeinander auf.	2,4	1	<b>0,6</b>
13	s.o.			19	Es war gut, dass wir chemische Inhalte an Problemen erarbeitet haben, die mit meinem Körper zu tun haben.	2,1	0,8	<b>0,5</b>
13	s.o..			24	In diesem Unterricht habe ich mich angestrengt, weil ich glaube, dass es wichtig ist, diese Inhalte zu verstehen.	2,6	0,9	<b>0,6</b>
13	s.o.			30	In diesem Unterricht wollte ich wissen, wie es weitergeht und noch mehr erfahren.	2,7	0,8	<b>0,6</b>
10	In diesem Unterricht lernten wir nicht die Chemie, die für mich wichtig ist.	4	1	14	Ich habe Fragen zu diesem Thema. Allerdings haben wir genau diese Inhalte nicht behandelt.	4,2	0,7	<b>0,5</b>
10	s.o.			16	Ich habe schon früh den Anschluss verloren.	4,2	1	<b>0,75</b>
10	s.o.			18	Ich fand das Thema Atmen unter Extrembedingungen uninteressant.	4,2	0,8	<b>0,8</b>
10	s.o.			23	In diesem Unterricht war ich mit meinen Gedanken häufig woanders.	3,9	0,7	<b>0,5</b>
10	s.o.			25	In diesem Unterricht habe ich mich nur wegen der Noten angestrengt.	3,4	1,0	<b>0,7</b>
10	s.o.			29	Der Chemieunterricht zu diesem Thema war mir meistens egal.	4,1	0,8	<b>0,7</b>
10	s.o.			37	Mir hätte die Lehrkraft sagen sollen, was wichtig ist.	3,6	0,9	<b>0,5</b>

### Zusammenfassung und Deutung der Teilergebnisse

Folgende Aussagen lassen sich aus den errechneten Korrelationskoeffizienten ableiten:<sup>41</sup>

- Die vier Korrelationskoeffizienten der Itempaare 13/17, 13/19, 13/24, 13/30 sind signifikant und positiv. Die Zustimmung zu Item 13 geht mit einer Zustimmung zu Item 17, 19, 24 und 30 einher.
- Die sieben Korrelationskoeffizienten der Itempaare 10/14, 10/16, 10/18, 10/23, 10/25, 10/29, 10/37 sind ebenfalls signifikant und positiv. Die Ablehnung von Item 10 geht mit einer Ablehnung der Items 14, 16, 18, 23, 25, 29, 37 einher.

<sup>38</sup> arithmetisches Mittel (gerundet)

<sup>39</sup> Standardabweichung (gerundet)

<sup>40</sup> Korrelationskoeffizient  $r$  (gerundet)

<sup>41</sup> Die Aussagekraft der Befunde ist eingeschränkt, da unkontrollierte Einflüsse, die in den Persönlichkeitsvariablen der Beteiligten liegen, möglich sind und das Messergebnis verfälschen können.

Eine Unterscheidung zwischen abhängigem und unabhängigem Merkmal ist bei dieser Art von Untersuchungsanlage nicht möglich. Ebenso lassen sich mit den Ergebnissen der Korrelationsanalyse keine Aussagen über kausale Beziehungen zwischen den Variablen treffen, da aus den Korrelationen sich viele denkbare Kausalmodelle konstruieren lassen (vgl. Bortz 1995 S. 483). Die Deutung der ausgewählten Korrelationen erfolgt aus dem Blickwinkel des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatzes. Die in dieser Untersuchung ausgewählten elf Korrelationen 13/17, 13/19, 13/24, 13/30, 10/25, 10/14, 10/16, 10/18, 10/23, 10/37, 10/29 sind kompatibel mit den hypothetisch postulierten Relationen zur Lernmotivation. Es gehören Zusammenhänge zwischen Merkmalen dazu, die zur Lernerpersönlichkeit gehören und die sich als Motivationsanreize aus der aktuellen Lernsituation ergeben.

Nach dem *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatz (Krapp 1999 S. 402) ist intrinsisch motiviertes Lernen mit der Bedeutsamkeit des Lerninhalts und der emotionalen Erfahrung in der Lernsituation verknüpft. In dem zugrunde liegenden Forschungsmodell wird die aktuelle Lernmotivierung durch Faktoren bestimmt, die einerseits in der Person des Lernalters liegen, andererseits Anreize von außen sind. Die Motivationsanreize von außen ergeben sich aus dem aktuellen sozialen Umfeld und durch die speziellen Anforderungen der Lernsituation. Zu den speziellen Anforderungen der Lernsituation gehören die Qualität des Unterrichts, der Schwierigkeitsgrad der gestellten Aufgabe und die Bedeutsamkeit des Lerninhalts. Diese Motivationsanreize bestimmen die aktuelle Lernmotivierung. Sie führen dazu, ob der Lerner sich selbstbestimmt wahrnimmt, aktiv und engagiert erlebt, sich kompetent und eingebunden empfindet oder ob er sich eher kontrolliert und verpflichtet fühlt.

Wird in einer konkreten Lernsituation das Lernen durch Faktoren bestimmt, die zum Lerner und zur Lernsituation gehören, dann führt das nach Auffassung von Krapp zu Konsequenzen, die sich als Veränderungen im Kopf des Lernalters ergeben und nicht unmittelbar gemessen werden können. Mittel – oder langfristig lassen sich die Wirkungen in Leistungsüberprüfungen messen. So wie die mittelbaren und langfristigen Folgen eines Lernprozesses auf den Lerner zurückwirken, beeinflussen auch die unmittelbaren Folgen die Lernmotivierung für nachfolgende Lernprozesse. Untersuchungen von Krapp (Krapp & Wild 1995) legen nahe, dass ein unmittelbares, positives Erlebnisgefühl während des Lernvorganges ein Hinweis auf eine Lernmotivierung ist, die auf den Lerner zurückwirkt und überdauernde Interessen fördert. Untersuchungen belegen weiterhin, dass das Interesse steigt, wenn ein Anwendungsbezug hergestellt wird und eine Anbindung an alltägliche Erfahrung gelingt (Hoffmann 1986 S. 189 - 204, Häußler 1995 S. 107 – 126 zitiert in Krapp 1996 S. 59).

Das von Krapp entwickelte Modell bietet nicht nur eine Erklärung für das Wecken von Interesse, sondern auch eine Erklärung für die Entwicklung von Interessen. Rückwirkend auf die zukünftige Lernmotivierung wird insbesondere die positive Erlebnisqualität gesehen, die mit der aktuellen

Lernhandlung verknüpft ist. Ist die Lernhandlung mit einem positiven Erleben verknüpft und ist der Lerngegenstand vorübergehend oder dauerhaft subjektiv bedeutsam, dann handelt es sich nach diesem Forschungsmodell um eine intrinsische Motivierung, die Interessen weckt und entwickelt. Untersuchungen legen nahe (Krapp 1996 S. 54), dass die engagierte innere Beteiligung am Unterricht, das Gefühl der Selbständigkeit und der sozialen Eingebundenheit sowie die momentane Einschätzung der eigenen Kompetenz von intrinsischen Motivationsanreizen abhängt. Zu den intrinsischen Motivationsanreizen gehören neben den Faktoren, die biographisch bestimmt sind und von der Lernerpersönlichkeit abhängen, auch die Faktoren, die von der speziellen Lehr – Lernsituation geboten werden. Dazu gehört auch die individuell eingeschätzte Bedeutsamkeit des Lerninhalts. In dieser Untersuchung sind folgende Korrelationen kompatibel mit dem in der Literatur veröffentlichten Erklärungsmodell zur Lernmotivation:

Die subjektive Bedeutsamkeit des Lerninhalts geht einher

- mit dem Wecken von Interesse (10/19, 10/18),
- mit dem Anwendungsbezug auf den eigenen Körper (13/19, 13/24),
- mit der Stärke des Engagements (13/30, 10/23),
- mit der Intensität des Autonomiegefühls (10/37, 10/14, 13/24, 10/25),
- mit der Anstrengungsbereitschaft (10/23, 10/25),
- mit der Ausprägung der Neugier (13/30),
- mit der Strukturierung des Unterrichts (13/17, 10/16, 10/14).

#### **4.3.4 Befunde aus der Faktorenanalyse**

Die Faktorenanalyse wird als Methode genutzt, um wechselseitige Zusammenhänge von mehreren Items auf wenige *latente* Merkmale zurückzuführen. Liegt ein größerer Satz von Variablen vor, so ist die Faktorenanalyse ein hilfreiches Verfahren, das Variablen in Gruppen ordnet. Diese Gruppen werden dann mit einer konstruierten Variablen, dem sogenannten *Faktor*, belegt, der mit allen zur Gruppe gehörigen Variablen so hoch wie möglich korreliert. Diese datenreduzierende Funktion der Faktorenanalyse ermöglicht eine übersichtliche Zusammenfassung der möglichen Korrelationen zwischen Items. Außer der Funktion, Korrelationsmuster übersichtlich darzustellen, ist die Faktorenanalyse auch dazu geeignet, sinnvolle Interpretationen zu finden für das gemeinsame Merkmal der Items, die unter einem Faktor zusammengefasst sind (Bortz & Döring 1995 S. 355, Tent 1993 S. 85).

## Faktor 1 ‚Lernmotivierung‘

Tabelle 35: Lernmotivierung (vgl. Anhang F 50)

Faktorladung	Nr. <sup>42</sup>	Item	arithmetisches Mittel	Standardabweichung	Median
0,734	17	Der Chemieunterricht war logisch strukturiert. Die Themen bauten sich für mich nachvollziehbar aufeinander auf.	2,4	1	2
0,718	30	In diesem Unterricht wollte ich wissen, wie es weitergeht und noch mehr erfahren.	2,7	0,8	3
0,695	13	Diese Chemiekenntnisse sind für mich bedeutsam.	2,6	1	3
0,663	11	Die gewonnenen Kenntnisse könnten mir im Alltag helfen.	2,6	1	2
0,654	62	Die Ergebnisse der Experimente regten mich zum Weiterdenken an.	2,9	1	3
0,637	31	Ich hatte das Gefühl, objektiv und fair bewertet worden zu sein.	2	1	2
0,635	28	Dieser Chemieunterricht hat mir Spaß gemacht.	2,4	1	2
0,631	39	Mir wurden gute Hilfestellungen gegeben.	2	1	2
0,624	7	Ich finde es interessant, wenn ich die Folgen meiner erhöhten Atemfrequenz mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen erklären kann.	2	1	2
0,609	19	Es war gut, dass wir chemische Inhalte an Problemen erarbeitet haben, die mit meinem Körper zu tun haben.	2	0,8	2
0,603	43	Ich hatte Gelegenheit, eigene Interessen und Fragen in den Unterricht einzubringen.	2,5	0,8	2
0,599	26	Der Inhalt hat mich so interessiert, dass ich mich auch außerhalb des Unterrichts damit beschäftigt habe.	3,6	1	4
0,595	47	<b>Mir</b> hat die Arbeit in den Lernstationen genügend Freiraum gegeben, <b>mein Wissen</b> zu erweitern und zu vertiefen.	2	1	2
0,587	40	Ich hatte das Gefühl, den Unterricht durch meine Beiträge voranbringen zu können.	3	1	3
0,555	59	Gefallen hat mir, dass die experimentellen Aufgaben mit dem Thema der Lernstation im eindeutigen Zusammenhang standen.	2,1	0,7	2
0,532	24	In diesem Unterricht habe ich mich angestrengt, weil ich glaube, dass es wichtig ist, diese Inhalte zu verstehen.	3	1	3

<sup>42</sup> Die Zahl bezieht sich auf das entsprechende Item in Fragebogen II

### *Auswertung der Faktorenanalyse zum Faktor 1*

Die Faktorenanalyse für den Fragebogen II zur Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ liefert einen Faktor, der sich deutlich in seiner prozentualen Varianz von den übrigen Faktoren unterscheidet (vgl. Anhang F 49). Das Leititem des Faktors 1 ist die Nr. 17 mit einer Faktorenladung<sup>43</sup> von 0,734. In die Betrachtung einbezogen werden 16 weitere Items, die unter dem Faktor 1 gebündelt sind. Das Item mit der Nr. 41 besitzt eine Faktorenladung von 0,549 und weist damit den geringsten Wert im Vergleich zu den 16 übrigen auf. Ergebnisse aus der Motivations- und Interessenforschung verhelfen zu einer sinnvollen Interpretation des Faktors 1 (vgl. Anhang F 49ff.). Durch den gewählten Untersuchungsplan ist die Validität der Befunde eingeschränkt. Der Einfluss personengebundener Variablen ist unkontrolliert.

### *Interpretation von Faktor 1*

Auf die Qualität des Unterrichts, speziell auf die besonderen Merkmale des Lerninhalts, beziehen sich im Rahmen dieser Untersuchung die Items 17, 13 und 11. Hervorgehoben werden darin die Bedeutsamkeit des Lernstoffs und sein logischer Aufbau.

Die subjektive Einschätzung der Unterrichtsqualität wird in sieben Items abgefragt (62, 31, 39, 43, 47, 40 und 41). Erfragt wird, in wie weit eine adäquate Hilfestellung (43 und 39), eine faire Bewertung (31), eine angemessene Herausforderung (47, 40 und 62) und die Möglichkeit zum selbständigen Arbeiten (41) im Unterricht gegeben war.

Drei Items beziehen sich auf die Bereitschaft des Lernenden, sich in der aktuellen Lernsituation anzustrengen (30, 26 und 24). Drei Items (7, 19 und 26) fragen das situative Interesse ab, das der Lerninhalt hervorruft.

Nach der Faktorenanalyse sind die Variablen, die auf ein gemeinsames Merkmal zurückzuführen sind,

- die Anstrengungsbereitschaft des Lernenden,
- die Bedeutsamkeit des Lerninhalts,
- die schlüssige Strukturierung des Lernstoffs,
- die aktuelle Hervorkehrung individueller Interessen,
- der Schwierigkeitsgrad der Lernanforderung,
- die selbständige Erarbeitung,
- die faire Bewertung.

Von Krapp werden sie als aktuelle Bedingungsfaktoren zusammengefasst, die motiviertes Lernen in konkreten Lernsituationen bestimmen. Hinter dem Faktor 1, der die Faktorenanalyse vorgibt,

---

<sup>43</sup> Korrelationsfaktor des Item mit dem Faktor (Bortz 1995 S. 482).

könnte sich daher aus der Perspektive der Motivations- und Interessenforschung das *latente* Merkmal ‚Lernmotivierung‘ verbergen. Sich interessiert, engagiert und selbständig im Unterricht zu erleben, scheint vom Grad der Lernmotivation abzuhängen, die - neben der biografisch bestimmten Anstrengungsbereitschaft - vom aktuell hervorgerufenen Interesse und den speziellen Anforderungen der Lernsituation abhängt.

### ***Faktor 2: Interesse an Körpervorgängen***

**Tabelle 36: Interesse an Körpervorgängen (vgl. Anhang F 50)**

<b>Faktorladung</b>	<b>Nr.<sup>44</sup></b>	<b>Item</b>	<b>arithmetisches Mittel</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Median</b>
0,752	9	Bekannt war mir, dass ich hyperventiliere, wenn mein Säure – Base – Haushalt gestört ist.	4	1	5
0,696	2	Ich habe schon vorher viel über das Tauchen gewusst.	4	1	4
0,533	40	Ich hatte das Gefühl, den Unterricht durch meine Beiträge voranbringen zu können.	3	1	3
0,531	61	Ich empfand das Anspruchsniveau der Aufgaben in den Lernstationen nicht angemessen.	4	0,7	4

#### *Auswertung der Faktorenanalyse zu Faktor 2*

- Item 2 und Item 9 korrelieren hoch mit dem Faktor 2. Beide Items beziehen sich auf das Vorwissen über den Lerninhalt der Unterrichtseinheit.
- Die Korrelationen der beiden nachfolgenden Items mit dem Faktor 2 sind im Vergleich zu den ersten beiden Items deutlich geringer.

#### *Interpretation von Faktor 2*

Das Gemeinsame, das den vier Items zugrunde liegen könnte, die mit dem Faktor 2 korrelieren, wäre das Interesse an chemischen Vorgängen im menschlichen Körper als überdauernde Vorliebe (Häußler 1998 S. 119). Ist das Interesse hoch, ist auch das Vorwissen hoch. Ebenso hoch ist das subjektive Kompetenz- und Autonomieempfinden (Item 40) sowie die subjektive Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Aufgabe (Item 61).

<sup>44</sup> Die Zahl bezieht sich auf das entsprechende Item in Fragebogen II

### **Faktor 3: Anreize der aktuellen Lernsituation**

Tabelle 37: Anreize der aktuellen Lernsituation (datei atmenfakt)

<b>Faktorladung</b>	<b>Nr.<sup>45</sup></b>	<b>Frage</b>	<b>arithmetisches Mittel</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Median</b>
0,656	52	Ich durfte im Chemieunterricht auch ‚dumme‘ Fragen stellen.	2	0,7	2
0,564	57	Die Versuchsvorschriften waren eindeutig.	2	1	2

#### *Interpretation von Faktor 3*

Der Faktor, mit dem beide Items relativ hoch korrelieren, könnte sich auf die Unterrichtsorganisation beziehen. Wird die Unterrichtsorganisation zustimmend befürwortet, waren die Versuchsvorschriften eindeutig und die Hilfestellungen angemessen. Der Faktor könnte umschrieben werden mit Anreize in der aktuellen Lernsituation.

#### **Zusammenfassung des Teilergebnisses und Folgerungen**

Der *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretische Forschungsansatz* (Krapp 1996 S. 48) nimmt an, dass die intrinsische Motivierung in einer konkreten Lernsituation von einem überdauernden Interesse, das durch die Biographie des Lernenden bestimmt ist, gesteuert wird. Das aktuelle soziale Umfeld und die spezielle Anforderung der Lehr- und Lernsituation liefern zusätzliche Motivationsanreize. Sie führen in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten dazu, in welchem Ausmaß der Lernende sich selbstbestimmt und aktiv wahrnimmt und sich kompetent und eingebunden fühlt. Untersuchungsergebnisse lassen nach Krapp den Schluss zu, dass die innere Wahrnehmung einer engagierten Beteiligung am Unterricht, wie sie sich in den genannten Erlebnisqualitäten zeigt, vom Grad der intrinsischen Lernmotivation abhängt (Krapp 1996 S. 56).

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse verweisen auf drei latente Merkmale, die als übergeordnete Faktoren jeweils das Gemeinsame des zugeordneten Itembündels in sich vereinen. Über abhängige und unabhängige Variablen kann aus der statistischen Datenaufbereitung der Faktorenanalyse keine Aussage getroffen werden. Das gilt sowohl für die Faktoren wie auch für die Merkmale, die das Itembündel präsentiert, das dem Faktor zugeordnet wird. Erfolgt die Interpretation der latenten Merkmale aus dem Blickwinkel des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen Forschungsansatzes*, könnte Faktor 1 mit der Lernmotivation gleichgesetzt werden, Faktor 2 mit dem Interesse an Körpervorgängen und Faktor 3 mit Anreizen aus der aktuellen Lernsituation. Daraus ergibt sich folgendes Geflecht von Variablen, das mit dem Forschungsmodell zur Lernmotivation (Krapp 1996 S. 48) kompatibel ist:

---

<sup>45</sup> Die Zahl bezieht sich auf das entsprechende Item in Fragebogen II

Die Lernmotivation geht einher

- mit einer aufeinander aufbauenden Struktur des Lerninhalts (Item 17),
- mit der subjektiven Bedeutsamkeit des Lerninhalts (Item 13, 11, 7, 19),
- mit der geweckten Neugier des Lernenden (Item 30, 43, 62),
- mit adäquaten Hilfestellungen (Item 39),
- mit einer fairen Bewertung (Item 31),
- mit einer positiven Erlebnisqualität (Item 28),
- mit einem Gefühl von Selbständigkeit (Item 47, 41, 43),
- mit einem Kompetenzzempfinden (Item 40, 41),
- mit einer Anstrengungsbereitschaft (Item 24, 26).

Das Interesse an Körpervorgängen geht einher

- mit einem speziellen Vorwissen (Item 9, 2),
- mit einem Kompetenzzempfinden (Item 40),
- mit einer subjektiven Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Aufgabe (Item 61).

Die Anreize der aktuellen Lernsituation gehen einher

- mit adäquaten Hilfestellungen (Item 52),
- mit eindeutigen Aufgabenstellungen (Item 57).

#### **4.3.5 Befunde zu Änderungseffekten**

Der Fragebogen I zum Chemieunterricht des vorangegangenen Jahres enthält 59 Items. Er wurde den Befragten vor der Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ vorgelegt. Die Befragten waren aufgefordert, sowohl in Fragebogen I wie in Fragebogen II die gleiche Codierung vorzunehmen. Fragebogen I und Fragebogen II enthalten 33 identische Items. Mit Hilfe der Codierung soll untersucht werden, ob und in welchem Ausmaß sich die Beantwortungstendenz der einzelnen Schüler und Schülerinnen ändert, nachdem der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ stattgefunden hat.

Die identischen Fragen beider Fragebögen werden nach den Faktoren sortiert, die nach Literaturangaben die Lernmotivation steuern (Krapp 1996 S. 51, Gräber 1992 S. 270 - 273, Häußler 1995a S. 107 - 126 zitiert in Häußler 1996 S. 125).

Der Schlüssel für die Sortierung sind folgende Motivationsanreize:

- Persönliche Bedeutsamkeit des Lernstoffs
- Aktuelle Hervorkehrung von Interessen
- Kompetenzzempfinden

- Autonomieempfinden
- Anstrengungsbereitschaft des Lernenden
- Bewertung der Lernstoffstrukturierung
- Einschätzung der Hilfestellung

Es werden von zwölf Itempaare die Mittelwertsunterschiede interpretiert. Es handelt sich dabei um die Paare 12/12, 13/09, 15/18, 46/43, 30/08, 14/17, 44/41, 34/31, 41/38, 36/45, 24/03, 52/55. Vernachlässigt werden in der Deutung diejenigen Mittelwertsunterschiede, deren Wert kleiner als plus 0,4 und größer als minus 0,4 ist.

### ***Bedeutsamkeit des Lerninhalts***

In den nachfolgenden Tabellen sind pro Item zwei Nummern angegeben. Die Nummer mit dem Buchstabenzusatz (A) entspricht der Nummer im Fragebogen II, die Nummer mit dem Buchstabenzusatz (F) bezieht sich auf die Nummerierung des gleichen Items in Fragebogen I. Die Werte für die Differenz der Mittelwerte sind gerundet.

**Tabelle 38: Bedeutsamkeit des Lerninhalts (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
12 (A)	Diese Kenntnisse sind nur für Chemiker wichtig.	4,0435	+ 0,8
12 (F)	s.o.	3,26	
13 (A)	Diese Chemiekennnisse sind für mich bedeutsam.	2,6222	- 1,1
09 (F)	s.o.	3,7174	
15 (A)	Ich denke, dass diese Kenntnisse für meinen späteren Beruf wichtig sein können.	3,3261	+ 1,2
18 (F)	s.o.	2,1304	
46 (A)	In diesem Unterricht lernte ich keine Fähigkeiten, die für mich persönlich bedeutsam sind.	3,9565	+0,4
43 (F)	s.o.	3,5652	

**Tabelle 39: Aktuelle Hervorkehrung von Interessen (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
26 (A)	Der Inhalt hat mich so interessiert, dass ich mich auch außerhalb des Unterrichts damit beschäftigt habe.	3,5435	+0,26
05 (F)	s.o.	3,2826	
28 (A)	Der Chemieunterricht hat mir Spaß gemacht.	2,3913	+0,37
07 (F)	s.o.	2,0217	
23 (A)	In diesem Unterricht war ich mit meinen Gedanken häufig woanders.	3,9348	+0,07
02 (F)	s.o.	3,8696	
30 (A)	In diesem Unterricht wollte ich wissen, wie es weitergeht und noch mehr erfahren.	2,7174	+0,46
8 (F)	s.o.	2,2609	

**Tabelle 40: Kompetenempfinden (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
14 (A)	Ich habe Fragen zu diesem Thema, allerdings haben wir genau diesen Inhalt nicht behandelt.	4,1556	+0,7
17 (F)	s.o.	3,4783	
44 (A)	Ich würde mir nicht zutrauen, im Chemieunterricht auch zu anderen Themen selbständig zu arbeiten.	3,9565	+0,8
41 (F)	s.o.	3,1739	
35 (A)	Ich konnte kaum eigene Vorschläge einbringen, die Stunden waren immer fertig geplant.	3,7826	+0,2
32 (F)	s.o.	3,5652	
45 (A)	Ich traue mir zu, später einen Beruf auszuüben, für den man Chemiekenntnisse benötigt.	2,2391	+0,3
42 (F)	s.o.	1,956	
16 (A)	Ich habe schon früh den Anschluss im Unterricht verloren.	4,1957	- 0,4
21 (F)	s.o.	4,5870	
49 (A)	Durch die Beiträge der anderen Schüler lernte ich kaum etwas.	3,6444	- 0,1
54 (F)	s.o.	3,7609	
51 (A)	Ich fühle mich zufriedener, wenn ich eigenständig einen Sachverhalt erschlossen habe.	2,2444	- 0,1
46 (F)	s.o.	2,3478	

**Tabelle 41: Autonomieempfinden (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
38 (A)	Dinge, die ich gut kann, nützen mir hier nichts.	3,413	- 0,3
35 (F)	s.o.	3,7	
51 (A)	Ich fühle mich zufriedener, wenn ich eigenständig einen Sachverhalt erschlossen habe.	2,2444	- 0,1
46 (F)	s.o.	2,3478	
42 (A)	Mir fehlte die Information, was ich am Ende können sollte.	3,2609	-0,04
39 (F)	s.o.	3,2174	
34 (A)	Ich konnte mir die nötige Zeit für die Erarbeitung einer Aufgabe selbst einteilen.	2,4565	- 0,6
31 (F)	s.o.	3,0435	
35 (A)	Ich konnte kaum eigene Ideen und Vorschläge einbringen, die Stunden waren immer fertig geplant.	3,7826	+ 0,2
32 (F)	s.o.	3,5652	
37 (A)	Mir hätte die Lehrkraft sagen sollen, was wichtig ist.	3,6	+ 0,3
34 (F)	s.o.	3,2826	
40 (A)	Ich hatte das Gefühl, den Unterricht durch meine Beiträge voranbringen zu können.	2,9130	+ 0,2
37 (F)	s.o.	2,6739	
41 (A)	Wir haben selbständiger gearbeitet als sonst.	1,9130	-1
38 (F)	s.o.	2,8478	
43 (A)	Ich hatte Gelegenheit, eigene Fragen und Interessen in den Unterricht einzubringen.	2,5	0,1
40 (F)	s.o.	2,413	
55 (A)	Alle wichtige Informationen kamen vom Lehrer.	3,2174	0,1
56 (F)	s.o.	3,1304	

**Tabelle 42: Bewertung der Lernstoffstrukturierung (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
17 (A)	Der Chemieunterricht war logisch strukturiert, die Themen bauten sich für mich nachvollziehbar aufeinander auf.	2,413	0,2
15 (F)	s.o.	2,2391	
36 (A)	Das Experimentieren hat mir besonders gut gefallen.	<b>2,0870</b>	<b>-1,7</b>
45 (F)	s.o.	<b>3,7391</b>	

**Tabelle 43: Einschätzung der Anstrengungsbereitschaft (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
24 (A)	In diesem Unterricht habe ich mich angestrengt, weil ich glaube, dass es wichtig ist, diese Inhalte zu verstehen.	<b>2,6087</b>	<b>- 0,4</b>
03 (F)	s.o.	<b>2,1957</b>	
25 (A)	In diesem Unterricht habe ich mich nur wegen der Noten angestrengt.	3,3478	- 0,15
04 (F)	s.o.	3,5	
27 (A)	In diesem Unterricht versuchte ich die Dinge so zu erledigen, wie sie von mir erwartet wurden.	1,9444	+0,05
06 (F)	s.o.	1,8913	

**Tabelle 44: Einschätzung der Hilfestellung und Bewertung (vgl. Anhang F 33 bis F 37 und F 12 – F 17)**

Nr.	Item	arithmetisches Mittel	Unterschiede zwischen den Mittelwerten
39 (A)	Mir wurden gute Hilfestellungen gegeben.	2,1957	-0,2
36 (F)	s.o.	2,3913	
52 (A)	Ich durfte im Chemieunterricht auch dumme Fragen stellen.	<b>1,8913</b>	<b>- 0,4</b>
55 (F)	s.o.	<b>2,3261</b>	
31 (A)	Ich hatte das Gefühl, objektiv und fair bewertet worden zu sein.	2,0435	-0,2
53 (F)	s.o.	2,2174	

#### *Deutung der Mittelwertsunterschiede*

- Die Mittelwertsunterschiede zwischen den Itempaaren 12 (A)/12 (F), 13 (A)/09 (F) und 46 (A)/43 (F) zeigen eine deutliche Tendenz. Die Kenntnisse, die im Rahmen des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erworben worden sind, werden bedeutsamer eingeschätzt als die vermittelten Chemiekennnisse in vorangegangenen Unterrichtseinheiten.
- Hingegen zeigt der Mittelwertsunterschied vom Itempaar 15 (A)/18 (F), dass die erlernten chemischen Kenntnisse im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ für den späteren Beruf weniger wichtig eingeschätzt werden.
- Auf eine tendenzielle Abnahme des Neugiereffektes verweist die Differenz zwischen den Mittelwerten vom Itempaar 30 (A)/08 (F).

- Das Selbstvertrauen in die eigene Kompetenz hat während der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ tendenziell zugenommen wie die Mittelwertsunterschiede der Itempaare 14(A)/17 (F) und 44(A)/41(F) zeigen.
- Nach Einschätzung der Schüler hat die selbständige Arbeit im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ebenfalls zugenommen. Dafür sprechen die Mittelwertsunterschiede der Itempaare 34(A)/31(F) und 41(A)/38(F).
- Die Bereitschaft sich anzustrengen hat tendenziell abgenommen. Der Mittelwertunterschied von Itempaar 24(A)/03(F) beträgt  $-0,4$ .
- Die Hilfestellungen, die im Rahmen der Unterrichtsorganisation ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ gegeben worden sind, werden im Vergleich zum vorangegangenen Chemieunterricht tendenziell besser eingeschätzt. Der Unterschied in den Mittelwerten des Itempaares 52 (A)/55(F) beträgt  $-0,4$ .
- Die Freude am Experimentieren hat deutlich zugenommen. Dafür spricht der Mittelwertunterschied von  $-1,7$  des Itempaares 36(A)/45(F).

### ***Ergebnisse des t-Testes***

Der t – Test überprüft, ob die Mittelwertsunterschiede, die sich bei der Beantwortung der identischen Fragen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergibt, statistisch signifikant sind. Für die Teilnehmeranzahl der Untersuchungsgruppe von 46 wird ein Grenzwert von 1,684 (Bortz 1993 S. 701, 1999 S. 775) angegeben. Ist der empirisch ermittelte Wert größer als 1,684 heißt das, dass mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit die Mittelwertsdifferenz statistisch signifikant ist (Bortz 1995 S. 464-466). Das Statistikprogramm liefert von allen möglichen Itempaaren, die sich aus den Fragebögen I und II ergeben, die t – Werte (vgl. Anhang F38 bis F 47). Die Mittelwerte, die das Statistikprogramm für die Itempaare neu beim t – Test errechnet, unterscheiden sich von den Mittelwerten, die für die jeweiligen Itempaare durch Differenzermittlung der Untersuchenden bestimmt werden. Verantwortlich für die Differenz der Werte sind die unterschiedlichen Datensätze. Für ein Item beispielsweise, das in beiden Fragebögen identisch ist, liegen in Fragebogen I 44 Datensätze vor, in Fragebogen II nur 42. Damit reduziert sich die Anzahl der Fälle für die Bestimmung des t – Wertes auf 42, da nur die Fälle in Frage kommen, die unter der gleichen Codierung Fragebogen I und Fragebogen II beantwortet haben.

Um eine Veränderung in der subjektiven Einschätzung und Bewertung festzustellen, sind nur die Mittelwertsunterschiede der identischen Fragen aussagekräftig. Von den identischen Fragen sind die t – Werte von zwei Itempaare statistisch signifikant. Es handelt sich um das Itempaar 34(A)/31(F) mit einem t- Wert von 4,15 (vgl. Anhang F 43) und um das Itempaar 42(A)/39(F) mit einem t- Wert von 7,32 (vgl. Anhang F 44).

Die selbständige Arbeit, zu der auch die individuelle Zeiteinteilung zur Bewältigung der Aufgaben gehört, hat demnach im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ nach Einschätzung der Schüler zugenommen. Das Item ‚Ich konnte mir die nötige Zeit für die Erarbeitung einer Aufgabe selbst einteilen‘, wird in Fragebogen II im Vergleich zu Fragebogen I eher zustimmend beantwortet. Abgenommen hat die Sicherheit, was an Wissen erwartet wird. Wurde in Fragebogen I das Item ‚Mir fehlte die Information, was ich am Ende können sollte‘ weder zustimmend noch ablehnend beantwortet, zeigte sich in Fragebogen II eher eine zustimmende Einschätzung.

### ***Zusammenfassung der Befunde zu den Änderungseffekten***

Statistisch bedeutsam sind die Mittelwertsunterschiede in den Antworten von zwei Items der Stichproben. Danach hat nach Einschätzung der Schüler selbständiges Arbeiten im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zugenommen. Abgenommen hat die Sicherheit, was an Wissen erwartet wird.

**Statistisch nicht abgesichert** sind Ergebnisse der Stichproben, die sich

- auf die Bedeutsamkeit des Lerninhalts,
- auf die Hervorkehrung von Interessen,
- auf das Kompetenzzempfinden,
- auf die Leistungsbereitschaft und
- auf die Einschätzung der Hilfestellung und Bewertung beziehen.

Es handelt sich dabei um Mittelwertsunterschiede, die aus der Beantwortung von zwölf Items nachweisbar sind. Die Gültigkeit der folgenden Veränderungshypothesen ist daher eingeschränkt, da die Stichproben zwar Mittelwertsunterschiede aufweisen, die Differenzen aber statistisch nicht abgesichert werden können. Ebenso wie ein signifikantes Ergebnis nur zu 95% wahrscheinlich ist, ist auch ein statistisch nicht signifikantes Ergebnis zu 5% unwahrscheinlich und ermöglicht damit eine Trendaussage (Bortz 1995 S. 464). Da die Unterschiede zufallsverteilt sein können, es aber nicht sein müssen, werden die Mittelwertsunterschiede, die sich **nicht** statistisch absichern lassen, dennoch wie folgt interpretiert:

- Die Kenntnisse, die im Rahmen des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erworben worden sind, werden bedeutsamer eingeschätzt als die vermittelten Chemiekenntnisse in vorangegangenen Unterrichtseinheiten.
- Eine Zunahme des Neugierereffektes kann nicht nachgewiesen werden.
- Das Selbstvertrauen in die eigene Kompetenz hat während der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zugenommen.
- Die selbständige Arbeit hat zugenommen.

- Die Hilfestellungen, die im Rahmen der Unterrichtsorganisation ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ gegeben worden sind, werden im Vergleich zum vorangegangenen Chemieunterricht besser eingeschätzt.
- Die Freude am Experimentieren hat deutlich zugenommen.

#### **4.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Befragung**

##### ***Ergebnisse zur Akzeptanz des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘***

Für 76% der Schüler entsprach das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ den Vorstellungen, die sie über einen Chemieunterricht haben. Die Mehrzahl der Befragten äußerte sich eher zustimmend zu folgenden Aussagen:

- Das Phänomen der Hyperventilation mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen erklären zu können, ist interessant, neu, bedeutsam und für die praktische Anwendung hilfreich.
- Das Gefühl, sich selbstbestimmt und kompetent in der Gruppenarbeit wahrzunehmen, wird gestärkt.
- Die Experimente sind in angemessener Anzahl, sie sind eindeutig dokumentiert und stehen im Zusammenhang mit den zu erklärenden Phänomenen. Der Schwierigkeitsgrad der zu lösenden Aufgaben ist angemessen.

##### ***Ergebnisse zur Korrelationsanalyse***

Folgende Korrelationen sind kompatibel mit dem in der Literatur veröffentlichten Erklärungsmodell zur Lernmotivation, das nach dem *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatz entwickelt wurde (Krapp 1999 S. 402):

Die subjektive Bedeutsamkeit des Lerninhalts geht einher

- mit dem Anwendungsbezug auf den eigenen Körper,
- mit der Ausprägung der Neugier,
- mit der Intensität des Autonomiegefühls,
- mit der Stärke der Anstrengungsbereitschaft,
- mit der Strukturierung des Unterrichts.

### ***Ergebnisse zur Faktorenanalyse***

Aus der Faktorenanalyse ergibt sich folgendes Variablengeflecht, das mit dem Forschungsmodell zur Lernmotivation (vgl. Krapp 1996 S. 48) kompatibel ist.

Die Lernmotivation geht einher

- mit einer nachvollziehbaren, aufeinander aufbauenden Struktur des Lerninhalts,
- mit der subjektiven Bedeutsamkeit des Lerninhalts,
- mit der aktuellen Hervorkehrung individueller Interessen,
- mit einer positiven Erlebnisqualität,
- mit der selbständigen Erarbeitung,
- mit einer Anstrengungsbereitschaft,
- mit einer fairen Bewertung.

Das Interesse an Körpervorgängen geht einher

- mit einem Vorwissen,
- mit einem Kompetenzzempfinden,
- mit einer subjektiven Einschätzung des Schwierigkeitsgrades der Aufgabe.

Die Anreize der aktuellen Lernsituation gehen einher

- mit adäquaten Hilfestellungen,
- mit eindeutigen Aufgaben.

### ***Ergebnisse zur Mittelwertsänderung***

Statistisch signifikant sind folgende Änderungseffekte:

- Selbständiges Arbeiten hat im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zugenommen.
- Die Sicherheit, was an Wissen erwartet wird, hat abgenommen.

Statistisch nicht signifikant sind folgende Änderungseffekte:

- Die Kenntnisse, die im Rahmen des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erworben worden sind, werden bedeutsamer eingeschätzt als die vermittelten Chemiekennnisse in vorangegangenen Unterrichtseinheiten.
- Das Selbstvertrauen in die eigene Kompetenz hat während der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zugenommen.
- Die Hilfestellungen, die im Rahmen der Unterrichtsorganisation ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ gegeben worden sind, werden im Vergleich zum vorangegangenen Chemieunterricht besser eingeschätzt.

- Eine Zunahme des Neugier-effektes lässt sich nicht feststellen.
- Demgegenüber hat die Freude am Experimentieren deutlich zugenommen.
- Zugenommen hat auch nach Einschätzung der Befragten die selbständige Arbeit.

#### 4.3.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Befunde aus der Fragebogenuntersuchung können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Die Befragung zur Akzeptanz des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ liefert Ergebnisse, die Merkmale der Untersuchungsgruppe beschreiben. Aufgelistet sind die Häufigkeiten der möglichen Antworten und die entsprechenden Mittelwerte. Diese Kenndaten werden zur deskriptiven Statistik gerechnet. Die Befunde des Signifikanztestes sowie der Korrelations- und Faktorenanalyse sind ebenfalls statistische Beschreibungen. Im Gegensatz zur beschreibenden Statistik testen sie Annahmen von Zusammenhängen, Unterschieden und Veränderungen. Hypothesenprüfende Untersuchungen (Bortz 1995 S. 459) fußen damit auf einer Forschungsperspektive, die den Hypothesen zugrunde liegt. Die Interpretation des statistischen Datenmaterials erfolgt daher aus dem Blickwinkel der entsprechenden Forschungsfrage.

Die Ergebnisse aus der vorliegenden Korrelations- und Faktorenanalyse stehen im Einklang mit dem Rahmenmodell des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatzes. In diesem Modell steht im Mittelpunkt des aktuellen Lehr- und Lerngeschehens die Lernmotivierung, indem sie den Prozess der Lernhandlung steuert. Die Art der Motivierung ist unterschiedlich. Ob der Lerner sich eher intrinsisch oder extrinsisch motiviert fühlt, ist von der Lernerpersönlichkeit, von der Lernsituation, vom Lerninhalt und von der sozialen Umgebung während des Lernprozesses abhängig. Angenommen wird, dass der Lerninhalt bedeutsam eingeschätzt wird, wenn er Interesse weckt. Das Interesse wird dabei als überdauernde Vorliebe gesehen, die sich entwicklungsbedingt durch aufeinander bezogene Lernprozesse eingestellt hat. Die subjektive Erlebnisqualität während des Lernprozesses verweist auf die Art der Motivationsanreize. Sind sie eher intrinsisch orientiert, fühlt der Lerner sich engagiert, wissbegierig, selbstbestimmt, kompetent und eingebunden. Extrinsische Motivationsanreize rufen eher eine gegenläufige Erlebnisqualität hervor.

Die Befunde aus der Faktorenanalyse widersprechen diesem Forschungsmodell nicht. Ein latenter Faktor, der eine hohe Aufklärungsvarianz besitzt, korreliert positiv mit der subjektiven Bedeutsamkeit des Lerninhalts, mit der geweckten Neugier des Lerners, mit seiner positiven Erlebnisqualität, mit seinem Gefühl von Selbständigkeit, mit seinem Kompetenzerfinden und mit seiner Anstrengungsbereitschaft. Aus der Perspektive des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatzes könnte dieses latente Merkmal der aktuell hervorgerufenen Lernmotivation entsprechen.

Das zweite latente Merkmal, das die Faktorenanalyse vorgibt, korreliert positiv mit dem Vorwissen und der aktuell empfundenen Kompetenz. Im Erklärungsmodell, das die bedeutsamen Faktoren der Lernmotivierung strukturiert, könnte dieser Faktor mit dem vorhandenen Interesse des Lernalters zum Lerninhalt gleichgesetzt werden.

Die Befunde der Korrelationsanalyse zeigen, dass die subjektive Bedeutsamkeit des Lerngegenstandes positiv korreliert mit drei Merkmalen, dem Anwendungsbezug auf den eigenen Körper, der Ausprägung der Neugier und der Intensität des Autonomiegefühls. Diese Zusammenhänge werden in der Literatur bestätigt: Aus Untersuchungen ist bekannt, dass das Interesse steigt, wenn der Bezug zum menschlichen Körper erkennbar ist (Krapp 1995 S. 59). Ist das Interesse geweckt, zeigt sich beim Lerner das im Gefühl von Selbständigkeit.

Die Befragung zur Akzeptanz des Lernzyklus zeigt, dass für 76% der Schüler das Thema ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ den Vorstellungen entsprach, die sie über einen Chemieunterricht haben. Die Mehrzahl der Befragten fanden die untersuchten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Körperphänomenen und ihren Ursachen interessant, neu, bedeutsam und hilfreich. Sie fühlten sich in der Lernsituation selbstbestimmt und kompetent. Nach ihrer Einschätzung waren die Experimente in ausreichender Anzahl, eindeutig dokumentiert und in den Erklärungszusammenhang eingebunden. Die zu lösenden Aufgaben waren in ihrem Schwierigkeitsgrad der Lernsituation angemessen.

Wie die Häufigkeitswerte zeigen, sind die Untersuchungsteilnehmer in ihren Einschätzungen heterogen. Die Anzahl derjenigen, die unzufrieden mit der Lehr – Lernsituation im Rahmen des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ waren, ist zwar verhältnismäßig gering, aber dennoch für die Evaluation bedeutsam. Ein Ergebnis der Signifikanzuntersuchung der Mittelwerte zeigt, dass nach Einschätzung der Schüler die Sicherheit, was an Wissen erwartet wird, im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ abgenommen hat. Das Ergebnis steht im Einklang mit einer kritischen Schüleräußerung zur Konzeption des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ (vgl. S. 145). Die Schülerin vermisst eine kleinschrittige Zubereitung des Lerninhalts. Sie fühlt sich verunsichert, da ihr eine ausreichende Absicherung des zu erwerbenden Wissens fehlt. Offenbar konnte diese Schülerin, die Freiräume, die die Lernumgebung zum selbständigen Lernen anbot, für sich nicht effizient nutzen. Ihr Festhalten an gewohnte und eingeübte Lernmethoden lassen die Vermutung zu, dass ihr verstärktes Sicherheitsbedürfnis sie daran hindert, sich auf neue und ungewohnte Lernfelder einzustellen.

Auffallend ist, dass 60% der Befragten das Unterrichtsgespräch für eine angemessene Methode hält, selbständiges Lernen zu fördern. Um einen Schereneffekt in der Wissensentwicklung der Schüler zu vermeiden, weil nur diejenigen gefördert werden, die sich auf die Lernumgebung einlassen können, muss man sich mit der Frage auseinandersetzen, unter welchen Bedingungen die

besondere Lernumgebung für ein effektives Lernen genutzt wird. Geht man davon aus, dass der Lernstil individuell unterschiedlich ist und will man diese Unterschiedlichkeit beachten, dann muss die Forschungsperspektive auf die vielfältigen Lernstrategien ausgerichtet werden, die zur Bewältigung von Aufgaben angewendet werden.

Es gibt verschiedene Modelle, die unterschiedlichen Lernstile von Lernenden beschreiben. Das Modell von Pask (1988 S.83 - 100) geht von zwei Lernstilen aus. In diesem dualistisch ausgerichteten Ansatz unterscheidet er zwischen *Serialisten* und *Holisten*. Die *Serialisten* beginnen von konkreten Einzelaspekten eines Sachverhaltes und nähern sich stufenweise mit folgerichtigen Schritten einem Gesamtverständnis an. Erst wenn sie einen Aspekt verstanden haben, wenden sie sich dem nächsten zu. Sie achten auf Details einer Sache und gehen vom Konkreten zum Abstrakten. Die *Holisten* verschaffen sich zuerst ein Gesamtbild von einer Sache. Sie konzentrieren sich auf komplexe Zusammenhänge, bevor sie die Details betrachten. Sie prüfen mehrere Aspekte gleichzeitig. Nach Auffassung von Pask enthält der individuelle Lernprozess beide Lernstile in unterschiedlicher Ausprägung.

Geht man von dem dualistischen Ansatz von Pask aus, ist zu prüfen, welches Sicherheitsnetz angeboten werden kann, um einen individuellen Lernstil zu stützen und weiter zu entwickeln. Zu untersuchen ist, ob in einer multimedialen Lernumgebung, die *situiertes* Lernen möglich macht, die vielfältigen Möglichkeiten der Verknüpfungen in computergestützten Lernprogrammen genutzt werden können, um nicht nur die *Holisten* zufrieden zu stellen, sondern auch die *Serialisten* unter den Lernern zu fördern.

Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ fand in einer Lernumgebung statt, in der die Schüler und Schülerinnen herausgefordert wurden, neue Inhalte und Zusammenhänge im Kontext von authentischen Problemstellungen selbständig zu erarbeiten. Sie sammelten eigene Erfahrungen, entdeckten komplexe Zusammenhänge und waren aufgefordert, in der Gruppe sich auszutauschen. Wie die Antworten im Fragebogen zur Akzeptanz des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ zeigen, gibt nach Einschätzung von 80% der Schüler die Gruppenarbeit genügend Freiraum, eigene Ideen zu entwickeln und selbständiges Lernen zu fördern. Die Mehrheit der Befragten hält damit die Gruppenarbeit für eine geeignete Methode im sozialen Austausch zu lernen.

20% der Befragten sind mit der Gruppenarbeit unzufrieden. Sie sind der Meinung, dass sie von anderen Schülern kaum etwas lernen. Sie fühlen sich durch die Gruppenarbeit behindert. Bemängelt wird vorwiegend der unterschiedliche Einsatz der einzelnen Gruppenmitglieder und die ungerechte Benotung. Offensichtlich wird die Gruppenarbeit als Methode nicht in Frage gestellt, sondern es werden die Fehlentwicklungen in der Arbeitsweise beklagt. Diese Befunde stehen im Einklang mit den Untersuchungen zum Lernzyklus ‚Treibstoffe‘ (Huntemann 2000). Zu vermuten

ist, dass die meisten Schüler zu wenig Erfahrung in Gruppenarbeit gesammelt haben, um die positiven Aspekte zur eigenen Lernentwicklung wahrnehmen zu können.

Bisher liegen in der Literatur nur wenige Befunde vor, die den Einfluss von sozialen Faktoren auf die Lernmotivierung nachweisen. Zu den Faktoren, die das soziale Umfeld bietet und die sich auf die aktuelle Lernmotivierung auswirken könnten, gehören vermutlich Schlüsselqualifikationen der Gruppenteilnehmer wie Teamfähigkeit, Kritikfähigkeit, Eigenständigkeit, und Verantwortungsbewusstsein. Anzunehmen ist, dass eine unterschiedliche Ausprägung dieser Persönlichkeitsmerkmale bei den Gruppenmitgliedern zu Störungen in der gemeinsamen Arbeit führen kann. Die situationsspezifischen Störungen wirken sich vermutlich auf die emotionale Erlebnisqualität der Lernenden aus.

Über den Zusammenhang zwischen der emotionalen Befindlichkeit der Lernenden und intrinsisch wirkenden Lernanreizen liegen Befunde vor. Untersuchungen von Krapp (Krapp, Schieferle & Wild 1993, Wild & Krapp 1996) legen nahe, dass die engagierte innere Beteiligung am Unterricht sowie die soziale Eingebundenheit sehr stark vom Grad der intrinsischen Motivierung abhängen. Hinweise dafür liefern Untersuchungen von amerikanischen Forschergruppen (Rathunde 1992, 1993, Csikzentmihalyi und Schieferle 1993). Sie haben sich mit den Bedingungen des sogenannten *Flow* – Erlebens beschäftigt. *Flow* beschreibt ein Gefühl, das empfunden wird, wenn das Handeln als einheitliches ‚Fließen‘ im Zeitverlauf empfunden wird und der Handelnde ganz in seiner Tätigkeit aufgeht. Nach Rathunde (1993) kann das *Flow* – Erleben als eine besondere Form der intrinsischen Motivierung aufgefasst werden. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Lernende im Zustand des *Flow* sich auf ihrem höchsten Leistungsstand befinden. *Flow* hat nicht nur Auswirkungen auf die aktuell erzielte Leistung, sondern auch auf die längerfristige Bereitschaft sich mit einer Sache dauerhaft auseinander zu setzen. Bei Untersuchungen mit Hochbegabten konnte nachgewiesen werden, dass die Häufigkeit des *Flow* – Erlebens in den Begabungsfächern ausschlaggebend für die Studienwahl war.

Wird das *Flow* – Erleben als Maß für den höchsten Grad der intrinsischen Motivierung definiert, so ergibt sich im Umkehrschluss die Annahme, dass die Lernsituation, die durch Störungen im Sozialkontakt der Lernenden geprägt ist und keine intrinsische Motivierung auslöst, sich auf langfristige Lernleistungen und Entwicklungen von Interessen negativ auswirkt.

#### 4.4 Concept-Mapping als Wissensdiagnose

Soll die Grundhypothese überprüft werden, dass kontextbezogenes, bedeutsames und eigenverantwortliches Lernen, welches im sozialen Austausch erfolgt, zu einem anschlussfähigen Wissen führt, das auch zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar ist, dann müssen geeignete Methoden gesucht werden, die eine Überprüfung sinnvoll machen und zu einer gültigen und zuverlässigen Aussage führen. Von einer prinzipiellen Messbarkeit des Merkmals ‚Wissen‘ wird dabei ausgegangen (vgl. Eckert 1998 S. 15).

In den letzten Jahren sind Concept-Maps in Forschungsprojekten der naturwissenschaftlichen Didaktiken im Zusammenhang von Wissenspräsentationen zunehmend bedeutender geworden (Fischer 1998, Novak 1985, Fischer & Mandl 2000, Fischler & Peukert 2000). Concept-Mapping wird als innovative Technik zur Erfassung von Wissen und Schülerleistungen gesehen (Brettschneider 1997, Eckert 1998, Jonassen, Beissner & Yacci 1993, Mandl & Ballstaedt 1986, Ruiz – Primo & Shavelson 1996, Tergan 1988, 1989a, 1989b, West, Fensham & Garrard 1985, Weber 1994b, 2000, Brandt, Elen, Hellemans, Heerman, Couwenberg, Volckaert & Morisse 2001).

Concept-Mapping wurde in den siebziger Jahren von Novak (1984, 1990, 1998) als Verfahren zur Wissensdiagnose entwickelt. Die Absicht war, den Wissenstand von Schülern vor und nach einem Lernangebot zu erfassen. Ausgangspunkt für Novak war, dass die üblichen Testverfahren nur einen Teil des Probandenwissens zur gestellten Aufgabe zeigten. Die Diskrepanz zwischen dem im Test gezeigten Wissen und dem offenbar vorhandenen, aber nicht genutzten Wissen zeigte sich in einer vorangegangenen Befragung der Probanden.

Bestätigt wird diese Diskrepanz in Untersuchungen von Ruiz – Primo. In dieser 1996 veröffentlichten Studie korreliert das im Concept-Map gezeigte Wissen nur begrenzt mit dem in einer Vergleichsgruppe erhaltenen Ergebnis im Multiple - Choice - Test. Ähnlich begrenzte Korrelationen werden auch in anderen Forschungszusammenhängen bestätigt. Interpretiert wird die Diskrepanz der Ergebnisse als Hinweis darauf, dass das Erstellen von Concept-Maps Aspekte des Wissens testet, die durch konventionelle Verfahren nicht erfasst werden (Schecker & Kliene 2000, Liu & Hinchey 1996, Stoddard, Abrams, Gasper & Canaday 2000).

Eine Erklärung für die unterschiedlichen Testergebnisse, die je nach Verfahren erzielt werden, bieten neuere kognitionspsychologische Konzepte. Nach dem Gedächtnismodell von Engelkamp hängt die Behaltensleistung nicht nur von den Informationen ab, die in der Lernphase aufgenommen werden und unterscheidbare Gedächtnisspuren hinterlassen, die eine spätere Rekonstruktion erleichtern. Die Behaltensleistung hängt auch von dem Testmaterial ab, das beim Abruf des Wissens benutzt wird. Je eher das Testmaterial eine dem Lernprozess ähnliche kognitive Aktivität fordert und je mehr mit dem Testmaterial auch der Kontext angesprochen wird, der beim

Lernen aufgenommen wurde, desto eher kann nach Engelkamp die Rekonstruktion gelingen<sup>46</sup>. Nach dieser Vorstellung ist der Erfolg beim Abrufen umso größer, je mehr der spezifische Abrufprozess auf Informationen zurückgreifen kann, die auch im Zusammenhang mitgelernt wurden. Die Behaltensleistung wird demnach umso höher,

- wenn die im Kontext angesprochenen Gedächtnisspuren deutlich voneinander unterscheidbar sind,
- wenn der Lernende in der Lernphase in Zusammenhängen lernt,
- wenn das Testmaterial die Möglichkeit bietet, komplexe Beziehungen herzustellen.

Eckert (1998 S. 144, S.126) wiederum konnte in seinen empirischen Untersuchungen den Einfluss des besonderen Verfahrens auf das Lernergebnis nicht nachweisen. Aus seiner Sicht scheint das Concept-Mapping einen eher geringen Effekt auszuüben auf das, was als Leistung gemessen wird. Seine Befunde weisen darauf hin, dass die besondere Art der Wissenserfassung sich eher auf die gewählte Lernstrategie der Probanden während des Tests auswirkt. Die angebotene Strukturierungshilfe des Lerngegenstandes begünstigt aus seiner Sicht strukturiertes Lernen, was aber nach seinen Befunden nicht am Lernergebnis der Probanden ablesbar ist.

Das Verfahren selbst, Concept-Maps zu erstellen, verlangt, dass die Probanden Begriffe netzartig miteinander verknüpfen und die Verknüpfungen benennen. Für die Gestaltung von Concept-Maps gibt es keine standardisierten Vorgaben. Fischler und Peuckert (2000 S. 14-15) listen eine Reihe von Forschungsberichten mit dem besonderen Einsatz von Concept-Maps auf, die eine Vielfalt der Möglichkeiten dokumentieren:

- Die Begriffe sind vollständig, teilweise oder gar nicht vorgegeben.
- Die Relationen zwischen den Begriffen stehen zur Auswahl zur Verfügung oder werden von den Probanden selbst formuliert.

In dieser Vielfalt der Gestaltung zeigt sich aber auch das Dilemma. Je nach Vorgaben unterscheidet sich das Antwortformat. Damit wird eine Vergleichbarkeit der erzielten Leistungen erschwert.

Je nach Forschungsprojekt werden in der Regel neben den Concept-Maps auch andere Diagnosemittel zum gleichen Untersuchungsgegenstand eingesetzt. Dahinter verbirgt sich die Annahme, dass verschiedene Erhebungsmethoden zum selben Phänomen durchgeführt werden müssen, wenn man an möglichst umfassenden Kenntnissen über das Wissen der Lernenden interessiert ist (Mayering 1999 S. 119 – 122, Lamnek 1995 S. 252 – 254). Als weitere Erhebungsmethoden, die die Ergebnisse der Concept-Maps ergänzen, bieten sich Essay- oder Wortassoziationstests an, so wie sie von Sumfleth (1988) vorgeschlagen und angewendet werden.

---

<sup>46</sup> Engelkamp unterscheidet itemspezifische von relationalen Informationen. Itemspezifisch sind alle Informationen, die zu einem Wort hin aktiviert werden. Relationale Informationen beziehen sich auf Zusammenhänge, die zwischen Lernitems hergestellt werden.

## **Anforderungen des Concept-Mappings an Gütekriterien der qualitativen Sozialforschung**

Wenn Concept-Maps mit klassischen Tests und Interviews prinzipiell nicht kompatibel sind, wie Schecker und Kliene vermuten (2000 S. 29), wenn andererseits angenommen wird (Eckert 1998 S. 72, S. 126), dass die Methode des Concept-Mappings eine Strukturierung der Probandenreaktionen hervorbringt, dann heißt das aber auch, dass Wissen nicht unabhängig von seiner Präsentationsform getestet werden kann. Concept-Maps erfassen Wissen in einer visuellen Form, die sich bei strukturierten Wissensgebieten mit wechselseitigen Abhängigkeiten anzubieten scheint. Diese Annahme steht im Einklang mit der gedächtnispsychologisch orientierten, konstruktivistischen Forschungsposition. Daraus erschließt sich eine spezifische Validität der Concept-Maps. Eckert (1998 S. 137) konnte in seiner Untersuchung zeigen, dass Zusammenhänge zwischen Tiefenverarbeitungsstrategien<sup>47</sup> und Qualitätsmerkmalen von Concept-Maps bestehen und schließt daraus auf eine Konstruktvalidität<sup>48</sup> der Concept-Maps.

Die klassischen Gütekriterien Validität und Reliabilität, die in der quantitativen Sozialforschung die Qualität eines Testes oder einer Befragung beurteilen, hält Mayring (1999 S. 115) im Rahmen der qualitativen Sozialforschung für wenig aussagekräftig. Er empfiehlt andere Gütekriterien für die qualitative Forschung. Dazu zählen die Verfahrensdokumentation, die Argumentative Interpretationsabsicherung<sup>49</sup>, die Regelgeleitetheit<sup>50</sup>, die Kommunikative Validierung<sup>51</sup>, die Nähe zum Gegenstand<sup>52</sup> und insbesondere die Triangulation<sup>53</sup> (Mayring 1999 S. 119 – 122). Im Rahmen dieser Untersuchung liegen der Verfahrensablauf des Concept-Mappings, die Datenaufbereitung und die Interpretation der Daten dokumentiert vor (vgl. Anhang C).

Eine Absicherung der Ergebnisse durch das Concept-Mapping wird nach Aussage von Mayring erreicht, wenn das Concept-Mapping im Film dokumentiert wird und die Filmtranskription als ergänzendes Datenmaterial zur Ergebnissicherung der gelegten Begriffsnetze genutzt wird. Ebenso denkbar wäre, ein nach dem Concept-Mapping sich direkt anschließendes Interview mit den Beteiligten, so dass die Möglichkeit einer zusätzlichen verbalen Äußerung bestünde. Beide

---

<sup>47</sup> Unter Tiefenverarbeitungsstrategien werden Elaborations-, Organisations- und Kontrollstrategien zusammengefasst (vgl. Eckert 1998 S. 115).

<sup>48</sup> Fallen die Testwerte so aus, wie es die aus der Theorie und Empirie abgeleiteten Hypothesen vorgeben, gilt der Test als konstruktvalid (Bortz 1995 S. 186).

<sup>49</sup> Die Gütekriterien ‚Verfahrensdokumentation und Argumentative Interpretationsabsicherung‘ dienen dazu, den Forschungsprozess nachvollziehbar zu machen. Während es bei der quantitativen empirischen Forschung ausreicht, dass das verwendete standardisierte Instrument für die methodische Beurteilung der Erhebung hinreichend ist, bedarf es bei der qualitativen Forschung einer detaillierten Darlegung des Vorgehens, damit der Forschungsprozess nachprüfbar wird. Ebenso müssen Interpretationen so dokumentiert werden, dass ein Nachvollzug möglich wird.

<sup>50</sup> Gemeint ist ein schrittweises Vorgehen, das den Forschungsprozess systematisiert.

<sup>51</sup> Das Gütekriterium der kommunikativen Validierung überprüft die Gültigkeit der Ergebnisse, indem sie nochmals den Befragten vorgelegt werden. Es kommt darauf an, die eigenen Ergebnisse an die Untersuchungsteilnehmer mitzuteilen, um aus dem sich anschließenden Dialog Argumente zur Bedeutsamkeit der Ergebnisse zu gewinnen (Mayring 1999 S. 121).

<sup>52</sup> Die ‚Nähe zum Gegenstand‘ ist ein methodisches Grundprinzip der qualitativen Forschung. Qualitative Forschung sollte sich auf die natürliche Lebenswelt der Untersuchten beziehen.

<sup>53</sup> Die Triangulation ist als Gütekriterium sehr weit gefasst. Gemeint sind verschiedene Methoden und Datenquellen, die herangezogen werden, um die Phänomene gründlicher zu fassen.

Verfahren zur Absicherung der Ergebnisse werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung genutzt.

- In der Gruppe mit dem *Paper – pencil – Instrumentarium*<sup>54</sup> überträgt die Untersuchende die erstellten Maps in eine word-Datei. Die Darstellung wird den Schülern zur Einsicht erneut vorgelegt, um im Sinne einer kommunikativen Validierung der Datenaufbereitung die Gültigkeit des Maps zu überprüfen (vgl. Anhang C 23, C 56, C 83, C 129).
- Die Filmtranskripte (vgl. Anhang C 3 – C 11, C 40 – C 47, C 73 – C 80, C 106 – C 120), die zur Bewertung genutzt werden, werden den Beobachtern, die das jeweilige Concept-Mapping filmten, zum Abgleich vorgelegt. Die Beobachter vergleichen die jeweiligen Transkripte mit den Filmsequenzen. Differenzen werden abgeglichen. Auch dieser Abgleich erfolgt im Rahmen einer kommunikativen Validierung (vgl. Anhang C 166 – C 176).

Die *Triangulation* ist das entscheidende Gütekriterium, das von qualitativen Sozialforschern (Lamnek 1995 S. 252 – 254, Mayring 1999 S. 119 – 122) genannt wird. Gemeint ist, dass durch unterschiedliche Bezugspunkte die Genauigkeit eines Untersuchungsgegenstandes bestimmt werden kann. Nach Lamnek (1995 S. 252 – 254) handelt es sich dann um die übliche Form der Triangulation, wenn verschiedene Erhebungsmethoden zum selben Phänomen durchgeführt werden, um profundere Ergebnisse zu erzielen.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden fünf unterschiedliche Methoden eingesetzt, um die Befunde zur Wissensdiagnose abzusichern und zu erweitern:

1. Zum Concept-Map wird eine Befragung durchgeführt und quantitativ ausgewertet. Gefragt wird nach der Akzeptanz der Methode zur Wissensaktivierung und zu Fehlentwicklungen in der Gruppenarbeit (vgl. Anhang C 200 – C 208).
2. In der Gruppe mit dem *Paper – pencil – Instrumentarium* findet eine Gruppendiskussion der Beobachter über das jeweilig erlebte und beobachtete Concept-Mapping statt (vgl. Anhang C 160 – C 165).
3. In der Gruppe mit dem softwareunterstützten Verfahren erfolgt nach dem Concept-Mapping eine Gruppendiskussion der Untersuchungsteilnehmer. Diskussionsleiter ist der jeweilige Beobachter. Die Diskussion erfolgt nach einem vorgegebenen Leitfaden (vgl. Anhang C 179 – C 180, C 184, C 188 – C 189, C 193).

---

<sup>54</sup> Paper – and – pencil versus softwareunterstütztes Mapping (vgl. Weber & Schumann 2000 S. 158)

4. Die Beobachter der Gruppen protokollieren in einem Aktivitätsprofil den unterschiedlichen Einsatz der Untersuchungsteilnehmer während des Concept-Mappings (vgl. Anhang C 17 – C 18, C 51 – C 52, C 83 – C 85, C 124 – C 125, C 181, C 185, C 190, C 194).
5. Das Wissen wird in einem zweiten Wissenstest überprüft, der einer üblichen Klausuraufgabe entspricht (vgl. Anhang C 209 C 214).

### ***Zusammenfassung***

In der Literatur wird mehrfach belegt (Schecker & Kliene 2000 S. 28, Peuckert & Fischler 2000 S. 91-117), dass Concept-Mapping grundsätzlich geeignet ist, naturwissenschaftliches Wissen von Schülern zu beurteilen. Für die Anwendung von Begriffsnetzen zur Wissenserhebung gibt es kein standardisiertes Verfahren. Die Begriffsnetze sind der Aufgabenstellung und der Untersuchungsmethode angepasst. Die Auswahl der vorgegeben Begriffe ist in der Regel so getroffen, dass der Fragende Auskunft über das verlangte Wissen erhält. Das Verfahren kann mit Papier und Bleistift oder softwaregestützt durchgeführt werden.

Concept-Mapping ist ein Verfahren, das nicht den Anforderungen an die Gütekriterien der klassischen Testtheorie entspricht. Um gesicherte Ergebnisse zu erzielen, wird von Vertretern der qualitativen Sozialforschung neben anderen Kriterien die *Triangulation* als entscheidendes Gütekriterium gefordert. Im Rahmen dieser Untersuchung werden verschiedene Methoden eingesetzt, die zur Absicherung und Präzisierung der Befunde dienen. Eingesetzt werden Befragungen, Gruppendiskussionen, Aktivitätsprofile und Leistungstests.

#### **4.4.1 Die Aufgabenstellung im Concept-Map**

Der Vorteil, der mit dem Einsatz von Concept-Maps als Erhebungsmethode verknüpft ist, zeigt sich darin, dass sich gerade mit dieser Methode komplexe Zusammenhänge besonders gut strukturieren lassen. Damit wird in der Darstellung vorhandenes Wissen präsent und kann bewertet werden. Da die Auswahl der Begriffe und die Anlage des Begriffsnetzes von der Aufgabenstellung abhängt, muss eine Aufgabe gefunden werden, die einen geeigneten Schwierigkeitsgrad hat, und komplex genug ist, um das erwartete Wissen im Concept-Map zu präsentieren. Unter diesen Bedingungen ist die Aufgabe nach Schecker und Kliene (2000 S. 47) inhaltsvalide.

#### **Hyperventilation - ein geeignetes Phänomen zum Concept-Mapping**

Wenn die Informationen zu Wissen verarbeitet werden, die relevant, praktisch, hilfreich, neu und anschlussfähig sind, muss auch die Aufgabe, die zur Überprüfung des erworbenen Wissens dient, so konstruiert sein, dass dieses Wissen dokumentiert werden kann. In dieser Untersuchung soll am Beispiel der Hyperventilation gezeigt werden, ob die entsprechenden Lerninhalte auch nach einem Zeitraum von vier Monaten als Gruppenwissen zur Verfügung stehen.

Die Aufgabe, Aspekte der Hyperventilation in einem Begriffsnetz darzustellen, zeichnet sich dadurch aus, dass die Beschreibung einer Körperreaktion verlangt ist, die von unterschiedlichen Parametern beeinflusst wird. Die Auswirkungen lassen sich nur mit dem chemischen Gleichgewichtskonzept befriedigend erklären. Voraussetzung ist, dass es ergänzt ist mit einer einfachen Vorstellung über sinnesphysiologische Verarbeitungsprozesse. Die Ereignisketten im Körper, die in Gang gesetzt werden, wenn der Säure – Base – Haushalt gestört ist, die kausalen Abhängigkeiten, die die Ereignisketten bestimmen, und die Rückwirkungen in sich selbst regulierenden Teilprozessen bieten sich zur visualisierten Darstellung in einem Begriffsnetz an.

Aus konstruktivistischer Sicht sind die Inhalte individuell unterschiedlich, die der einzelne Schüler in der Lernphase für sich aus dem Kanon der komplexen Sachinformationen als verwertbar herausfiltert. In wie weit das Phänomen zum Zeitpunkt der Überprüfung zusätzlich neu interpretiert wird, weil Erfahrungen sich widerspiegeln oder neu fokussiert werden, die unabhängig vom Unterricht waren, bleibt offen. Das Fachwissen, was präsentiert wird, ist im Lernzyklus erarbeitet worden, so dass über die Präsentation der Zusammenhänge auch eine Aussage getroffen werden kann über die Effizienz der besonderen Unterrichtsorganisation eines Lernzyklus (vgl. Tab. 30: Einschätzung des Vorwissens S. 140).

### **Fachsystematischer Aspekt**

Hyperventilation ist ein mehrfach vernetzter Aspekt im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘. Hyperventilieren, also verstärkt ein- und auszuatmen (wörtlich: zu überatmen), wird unterschiedlich ausgelöst. Je nachdem, welcher Parameter einwirkt, stellt sich das gleiche Phänomen ein, nämlich ein verstärkter Atemantrieb, der sich auf den Säure – Base – Haushalt auswirkt.

Hyperventilieren kann man aus verschiedenen Gründen.

- um den Atem zu unterdrücken (Lernstation ‚Blackout‘),
- bei Sauerstoffmangel (Lernstation ‚Atmen in großen Höhen‘),
- bei pH – Erniedrigung des Blutes (Lernstation ‚Blutpuffer‘).

Hyperventiliert man, um den Atem zu unterdrücken, wird der Export von Kohlenstoffdioxid aus dem Blut verstärkt, während der Kohlenstoffdioxid - Import aus dem Gewebe gleich bleibt oder nur geringfügig ansteigt. In Folge verringert sich die Oxoniumionenkonzentration, der pH – Wert steigt aufgrund des erniedrigten Kohlenstoffdioxidpartialdruckes in der Lunge und der dementsprechend reduzierten Konzentration von gelöstem Kohlenstoffdioxid in den Lungenkapillaren. Liegt der pH – Wert über 7,43<sup>55</sup>, handelt es sich um eine respiratorische Alkalose. Da die Chemorezeptoren, die das Atemzentrum aktivieren, auf einen erhöhten Kohlenstoffdioxidgehalt und einen verminderten pH – Wert im Blut ansprechen, flacht die Atemfrequenz ab.

---

<sup>55</sup> Bei einem pH – Wert von 7,44 liegt eine Alkalose vor. Bei einem pH – Wert unterhalb von 7,36 spricht man von Acidose (Rehner & Daniel 1999 S. 353).

Hyperventiliert ein Taucher vor seinem Tauchgang, wird er erst verspätet einen Atemreiz verspüren, da durch den niedrig gehaltenen Kohlenstoffdioxidgehalt im Blut die Atemantriebe vermindert sind und der während des Tauchens eintretende Sauerstoffmangel, wenn er als einziger wirkt, ein zu schwacher Atemreiz ist. Für den Taucher, der bewusst hyperventiliert, um seine Tauchzeit zu verlängern, besteht damit das Risiko, seine Sauerstoffreserven fehl einzuschätzen.

Liegt ein Sauerstoffmangel in der Umgebung vor, reagiert der Körper mit einer Erhöhung der Atemfrequenz. Der Körper antwortet auf den Sauerstoffmangel mit einer verstärkten Atmung, die sich auf den Säure – Base – Haushalt und auf den Sauerstofftransport auswirkt.

Ist der pH – Wert des Blutes aufgrund einer Stoffwechselanomalie stark abgesunken, wird ebenfalls eine Erhöhung der Atemfrequenz ausgelöst. Kommt es im menschlichen Körper zu einer verstärkten Säurebildung und damit zu einem erhöhten Eintrag von Oxoniumionen ins Blut, so liegt im Blut eine Störung des Kohlenstoffdioxid – Hydrogencarbonat - Gleichgewichtes vor, die durch den Blutpuffer nicht mehr ausgeglichen werden kann. Der pH – Wert sinkt deutlich. Der Körper kompensiert zunächst die Zunahme der Oxoniumionenkonzentration durch verstärktes Ein – und Ausatmen. Die Hyperventilation wird ausgelöst, da die Oxoniumionen- und die gelösten Kohlenstoffdioxidmoleküle im Blut zunehmen, was von adäquaten Chemorezeptoren wahrgenommen wird, die das Atemzentrum informieren, was zur Erhöhung der Atemfrequenz führt.

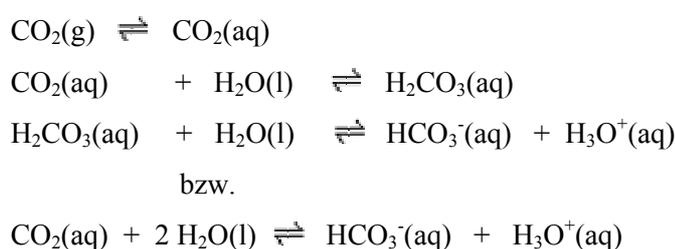
### **Kognitive Lehrziele**

Erwartet werden Zusammenhänge über die wechselseitige Beeinflussung zeitgleich vorliegender Kohlensäuregleichgewichte, eine quantitative Beschreibung durch entsprechende Gesetzmäßigkeiten und die Auswirkungen der Gleichgewichtslage auf die Effizienz der entsprechenden Pufferlösung. Die erwarteten Leistungen lassen sich fachsystematisch in drei inhaltliche Kategorien einordnen.

- Die Dynamik der sich wechselseitig beeinflussenden Gleichgewichte
- Das Le Chatelier Prinzip und das MWG
- Die Pufferlösung und ihre Pufferkapazität

#### *Zur Dynamik der sich wechselseitig beeinflussenden Gleichgewichte*

Zeitgleich vorliegende Gleichgewichte beeinflussen sich wechselseitig, je nachdem, welche Störung auftritt. Im Blut liegen das Löslichkeitsgleichgewicht von CO<sub>2</sub> und die Protolyse der Kohlensäure nebeneinander vor.



Wird die Atemfrequenz erhöht und verstärkt ausgeatmet, erniedrigt sich der Partialdruck von  $\text{CO}_2$  in den Lungenkapillaren. Damit erniedrigt sich die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  in den Kapillaren. Das Gleichgewichtssystem reagiert darauf, indem die Bildung von  $\text{CO}_2$  erhöht wird unter Verbrauch von Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen. Es stellt sich ein neues Gleichgewicht ein mit veränderten Gleichgewichtskonzentrationen.

Liegt eine Stoffwechselstörung vor und ist der pH – Wert erniedrigt, wird der Säureeintrag kompensiert. Hydrogencarbonationen werden vermindert, die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  erhöht sich und der Partialdruck von  $\text{CO}_2$  nimmt zu, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

#### *Zum Prinzip von Le Chatelier und zum MWG*

Das Prinzip von Le Chatelier ist hilfreich, um eine Vorhersage über die Gleichgewichtskonzentrationen zu machen, die nach einer Störung im sich neu einstellenden Gleichgewicht vorliegen. Wird der Partialdruck von  $\text{CO}_2$  erniedrigt, versucht das System die Störung auszugleichen. Da in jedem Gleichgewicht zwei Reaktionen stattfinden und die zweite Reaktion die Rückreaktion der ersten ist, kann die Störung kompensiert werden, wenn zunächst die Teilreaktion bevorzugt wird, die der Störung entgegenwirkt.

Das Massenwirkungsgesetz ist eine Gesetzmäßigkeit, die quantitativ das chemische Gleichgewicht beschreibt. Der Quotient aus den molaren Konzentrationen der Produkte und Edukte im Gleichgewicht ergibt die Gleichgewichtskonstante  $K$ . Für die quantitative Beurteilung ist es häufig zweckmäßig das MWG nach Umformung zu logarithmieren.

#### *Zur Pufferlösung und zur Pufferkapazität*

Immer dann, wenn der pH – Wert sich kaum ändert, obwohl ein saurer oder alkalischer Eintrag erfolgte, spricht man von einem Puffer. Hydrogencarbonat als Pufferkomponente bildet das Reservoir, das für die Abschwächung des sauren Eintrages verantwortlich ist. Dementsprechend vermindert gelöstes Kohlenstoffdioxid - also die Kohlensäure - den basischen Eintrag.

Am unempfindlichsten ist der pH – Wert einer Pufferlösung gegen die Zugabe von Säure und Base, wenn die Stoffmengen von gelöstem  $\text{CO}_2$  und Hydrogencarbonat gleich sind. Die Lösung hat die größte Pufferkapazität, wenn das Stoffmengenverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlenstoffdioxid eins beträgt. Die Pufferkapazität ist besonders gering, wenn das Verhältnis der Stoffmengen von Hydrogencarbonat und Kohlenstoffdioxid sich stark unterscheidet.

### **4.4.2 Anpassung der Hypothesen**

Wird das Phänomen ‚Hyperventilation‘ als Aufgabenstellung gewählt, müssen die Grundhypothesen, die Ausgangspunkt der Untersuchung sind (vgl. S. 129), spezifiziert werden. Sie werden im letzten Punkt wie folgt variiert:

Die selbständige und multiperspektivische Erarbeitung der ausgewählten Inhalte im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘

- enthält bedeutsam eingeschätzte Lerninhalte,
- weckt Interesse,
- ist verknüpft mit einem hohen Maß an Eigentätigkeit und Eigenverantwortung,
- wirkt sich auf das Kompetenz- und Autonomieempfinden aus,
- beeinflusst die positive Erlebnisqualität und die Lernmotivierung in der Lernsituation,
- verändert die Lehrerrolle zum Moderator und Lernberater,
- erhöht die Medienkompetenz,
- fördert die Behaltenleistung,
- führt zu einem strukturierten und anschlussfähigen Wissen,  
das zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar ist  
und zur Erklärung des Phänomens ‚Hyperventilation‘ genutzt werden kann.

#### 4.4.3 Die Gestaltung des Concept-Maps

Im Concept-Map soll das Wissen visualisiert dargestellt werden, was die Lernenden zum Zeitpunkt der Untersuchung über das Phänomen ‚Hyperventilation‘ präsent haben. Da zur Erklärung der komplexen Zusammenhänge Elemente des Gleichgewichtskonzeptes wie auch physiologische Reaktionen im Körper erinnert werden müssen, werden Begriffe vorgegeben, die mit einem ‚geworfenen Anker im Gedächtnis‘ vergleichbar sind.

Dabei handelt es sich um folgende Begriffe, Phänomene und Terme:

1. Säureabgabe ins Blut
2. Erhöhung der Atemfrequenz
3. Pufferkapazität
4. Gleichgewichtslage
5. MWG
6. Le Chatelier Prinzip
7. Löslichkeit von CO<sub>2</sub>
8. pH – Werterniedrigung
9. Konzentration von Hydrogencarbonat
10.  $\frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)} = \frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{CO}_2)}$

Wird das *Paper – and – pencil – Instrumentarium* (Weber & Schumann 2000 S. 158) verwendet, bilden Schüler vier Gruppen zu vier bis fünf Schülern. Jede Gruppe erhält die gleiche Kurzbeschreibung des Phänomens. Zur Charakterisierung des Phänomens stehen 10 Begriffe zur Verfügung, die auf Karten vorgegeben sind und die durch weitere Begriffe beliebig ergänzt werden

können. Die Begriffe sind auf einem DIN A0 Papier zu einem Begriffsnetz sinnvoll zu ordnen. Im Zusammenhang stehende Begriffe werden über Linien miteinander verbunden. Der inhaltliche Zusammenhang wird auf der Linie beschrieben, und ein Pfeil gibt die Richtung der Beziehung an. Die Reihenfolge der Karten ist willkürlich. Als Hilfsmittel stehen die beschrifteten Karten, eine Reihe von leeren Karten, Eddingstifte und Klebstoffe zur Verfügung. Weitere Hilfsmittel wie Hefte, Bücher sowie andere Unterlagen sind nicht zugelassen. Bei Bedarf können sich Schüler weitere leere Karten nehmen, so dass die zur Verfügung stehende Kartenanzahl keine Begrenzung für die Anzahl der Begriffe sein soll.

Wird die Begriffslegetechnik softwareunterstützt, stehen zusätzlich zu den oben genannten Begriffen auch 20 Verknüpfungen zur Auswahl, die beim Aufruf der Netzkonstruktion zur Verfügung stehen. In dem Analysemodul der software wird einerseits das einzelne Netz analysiert, andererseits kann auch ein Vergleich zwischen Probandennetz und Expertennetz vorgenommen werden.

#### *Schülerbezogene Vorbedingungen zum Concept-Mapping*

Säure – Base – Gleichgewichte und ihre quantitative Beschreibung sind fachsystematische Inhalte, die in Niedersachsen zum Lehrzielkanon des 12. Jahrganges gehören. Es ist davon auszugehen, dass das im Concept-Map diagnostizierte Wissen im Rahmen des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erworben, kontrolliert und abgeprüft wurde. Jede Gruppe hatte einen Bericht zu erstellen (vgl. Anhang L 80 – L 98), der die Bearbeitung der Aufgaben in den einzelnen Lernstationen umfasste und der nach beigelegten Bewertungskriterien (vgl. Anhang L 99) zensiert wurde. Zu den Bewertungskriterien gehörten die korrekte Messwerterfassung, eine angemessene Beschreibung der Messergebnisse, schlüssige Deutungen und eine widerspruchsfreie, vollständige Bearbeitung der zu jeder Station beigelegten Aufgaben. Alle Gruppen zeigten in den Langzeithausaufgaben gute und sehr gute Leistungen. Zur Leistungsüberprüfung wurde im Rahmen der Unterrichtseinheit eine Klausur geschrieben. Die Klausur war eine theoretische Klausur, die an Inhalte der Lernstationen 1-3 anknüpfte (vgl. Anhang L 74 – L 79).

#### *Zusammenfassung*

1. Die Schülerinnen und Schüler haben die Lernstationen – ‚Taucherflöhe‘, ‚Barotrauma‘, ‚Blackout‘, ‚Sauerstofftherapie nach einem Tauchunfall‘, ‚Blutpuffer – Möglichkeiten und Grenzen‘, ‚Puffer im Vergleich‘ - in einem Zeitraum von 30 Unterrichtsstunden bearbeitet.
2. Sie haben eine Langzeithausaufgabe angefertigt, die Auswertungen, Deutungen und weiterführende Betrachtungen zu den Lernstationen enthält. Eine Benotung jedes Berichtes nach vorgegebenen Kriterien liegt vor.
3. Weiterhin wurde eine Klausur geschrieben, die auf die Inhalte der Stationen 1 – 3 aufbaute.
4. Die Schülerinnen und Schüler sind im Erstellen von Concept-Maps geübt.

### Untersuchungsablauf mit dem Paper – and – pencil – Instrumentarium

Vier Monate nach der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erhalten die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe, in Gruppenarbeit ein Concept-Map zum Phänomen ‚Hyperventilation‘ zu erstellen. Die Gruppen befinden sich in unterschiedlichen Räumen. Die Interaktion der Schüler untereinander wird jeweils mit einer digitalen Filmkamera aufgenommen. Alle Gruppen sollen gefilmt werden, um möglichst umfassende Informationen über die inhaltlichen und gruppendynamischen Prozesse beim Erstellen der Maps zu erhalten. Zusätzlich erhalten die Schüler den Auftrag, den Entstehungsprozess ihrer Concept-Maps mit einer digitalen Bildkamera zu dokumentieren.

Jeder Gruppe wird ein Beobachter zugeordnet, der auch die Filmkamera bedient. Der Beobachter hat zusätzlich die Aufgabe, die Aktivität der einzelnen Gruppenteilnehmer mit Hilfe einer Aktivitätsskala von 1-5 im Zeitverlauf zu erfassen (vgl. Anhang C 17 – C 18, C 51 – C 52, C 83 – C 85, C 124 – C 125, C 181, C 185, C 190, C 194). Weiterhin steht dem Beobachter ein Expertenmap zur Verfügung (vgl. Anhang C 19). Werden von den Schülern Begriffe und Zuordnungen zusätzlich genannt, die nicht im Schülermap dargelegt werden, so sind diese vom Beobachter in einer Zeitschiene zu notieren<sup>56</sup>.

### Untersuchungsplan für Gruppe HOF mit dem Paper – and - pencil - Instrumentarium

<b>Ziel der Untersuchung</b>	Untersucht werden soll, <ul style="list-style-type: none"><li>• ob und in welchem Umfang Schüler sich an die Inhalte zum Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erinnern,</li><li>• ob und in welchem Umfang den Schülern ein strukturiertes Wissen zum chemischen Gleichgewicht zur Verfügung steht.</li></ul>
<b>These</b>	Im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erarbeitetes, multiperspektivisch erworbenes Wissen erhöht die Akzeptanz <sup>57</sup> des Chemieunterrichts und führt zu einem strukturierten und anschlussfähigen Wissen, das nach vier Monaten verfügbar ist und zur Erklärung des Phänomens ‚Hyperventilation‘ genutzt werden kann.

#### Untersuchungsdesign

<b>Erstellen eines Begriffsnetzes</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Die 17 Schüler bilden vier Gruppen zu vier bis fünf Schülern.</li><li>• Jede Gruppe erhält die gleiche Kurzbeschreibung eines Phänomens.</li><li>• Zur Charakterisierung des Phänomens stehen 10 Begriffe zur Verfügung, die auf Karten vorgegeben sind und die durch weitere Begriffe beliebig ergänzt werden können.</li></ul>
---------------------------------------	--

<sup>56</sup> Die Untersuchung wurde in Zusammenarbeit mit dem Studienseminar Göttingen durchgeführt. Beteiligt waren Herr Heidborn vom Studienseminar Göttingen, Herr Pabst vom Studienseminar Hildesheim, Frau Asendorf und Frau Adam, zwei Referendarinnen vom Studienseminar Göttingen.

<sup>57</sup> Zur Akzeptanz zählen: Autonomie- und Kompetenzzempfinden, aktualisiertes Interesse am Lernstoff, Einschätzung der Unterrichtsorganisation.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es handelt sich um folgende Begriffe, Phänomene und Terme: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Säureabgabe ins Blut,</li> <li>2. Erhöhung der Atemfrequenz,</li> <li>3. Pufferkapazität,</li> <li>4. Gleichgewichtslage,</li> <li>5. MWG,</li> <li>6. Le Chatelier Prinzip,</li> <li>7. Löslichkeit von CO<sub>2</sub>,</li> <li>8. pH – Erniedrigung,</li> <li>9. Konzentration von Hydrogencarbonat,</li> <li>10. <math>\frac{c(HCO_3^-)}{c(H_2CO_3)} = \frac{c(HCO_3^-)}{c(CO_2)}</math>.</li> </ol> </li> <li>• Die Begriffe sind auf einem DIN A0 Papier zu einem Begriffsnetz sinnvoll zu ordnen und aufzukleben.</li> <li>• Im Zusammenhang stehende Begriffe werden über Pfeile miteinander verbunden. Der Zusammenhang wird auf der Linie beschrieben und der Pfeil gibt die Richtung der Beziehung an.</li> </ul> <p><u>Anmerkung:</u> Als Hilfsmittel stehen zur Verfügung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die beschrifteten Karten,</li> <li>• eine Reihe von leeren Karten,</li> <li>• Eddingstifte und Klebstoffe,</li> <li>• weiße Unterlage, evt. DIN A0 – Papier,</li> </ul> <p>Weitere Hilfsmittel wie Hefte, Bücher sowie andere Unterlagen sind nicht zugelassen. Bei Bedarf können sich Schüler leere Karten nehmen und beschriften, so dass die zur Verfügung stehende Kartenanzahl keine Begrenzung für die Anzahl der Begriffe sein soll.</p>
<b>Zeitpunkt:16.03.01</b>	Vier Monate nach der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erhalten die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe, in Gruppenarbeit ein Concept-Map zum Phänomen Hyperventilation zu erstellen.
<b>Aufgabenstellung</b>	<p><u>Thema:</u> Hyperventilation</p> <p>Kurzinformationen zum Phänomen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hyperventilieren ist aus verschiedenen Gründen möglich. Entspricht der pH – Wert des Blutes nicht mehr der Norm, da eine Stoffwechselstörung vorliegt, kann hektisches Ein- und Ausatmen die Folge sein.</li> <li>• Hyperventilieren können Sie aber auch, um damit Ihren Atemreiz zu unterdrücken. Genutzt wird diese Methode nicht selten von Tauchern, die vor dem Tauchgang durch verstärktes Ein und Ausatmen gezielt ihre individuelle Tauchzeit verlängern.</li> </ul> <p><u>Aufgabe</u> Erklären Sie das Phänomen der Hyperventilation, das durch unterschiedliche Bedingungen ausgelöst werden kann.</p>

	<p><u>Anmerkungen</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ihnen stehen 10 beschriftete Karten zur Verfügung. Nach Bedarf können Sie zur Ergänzung weitere Karten hinzunehmen und sie entsprechend beschriften.</li> <li>2. Ordnen Sie die Begriffe in einem Begriffsnetz sinnvoll einander zu.</li> <li>3. Verbinden Sie mit einem Pfeil die Begriffe, die miteinander in Beziehung stehen. Die Pfeilspitze gibt die Richtung der Beziehung an.</li> <li>4. Beschriften Sie jede Linie mit einem Verb oder einer Präposition, so dass der Zusammenhang zwischen den verbundenen Begriffen deutlich wird. Sie haben 60 Minuten Bearbeitungszeit zur Verfügung.</li> <li>5. Zur Dokumentation von Teilergebnissen können Sie eine digitale Bildkamera benutzen.</li> </ol>
<b>Dokumentation der Beobachtungen</b>	Die Gruppen befinden sich in unterschiedlichen Räumen. Die Interaktion der Schüler untereinander wird jeweils mit einer digitalen Filmkamera aufgenommen. Alle Gruppen sollen gefilmt werden, um möglichst umfassende Informationen über das Erstellen von Maps zu erhalten. Zusätzlich erhalten die Schüler den Auftrag, den Entstehungsprozess ihres Concept-Maps mit einer digitalen Bildkamera zu dokumentieren.
<b>Zeitbedarf</b>	Die Schüler haben bisher zwei Concept-Maps erstellt: Ein Map zur Kinetik der Entfärbung von Phenolphthalein im stark alkalischen Milieu und ein Map zur Theorie der Farbstoffe. Für die Erstellung der Concept-Maps zur Hyperventilation sind maximal zwei Schulstunden geplant.
<b>Vorlauf:</b> <b>05.03.01 - 15.03.01</b>	<p>Am 16.3. werden vier Beobachter benötigt, die vorher in ihre Aufgaben eingewiesen werden müssen.</p> <p>Da anzunehmen ist, dass die Schüler während der Erstellung des Concept-Maps nicht laut und deutlich sprechen, ist die Akustik im Raum vorher zu überprüfen, so dass trotz leiser und evt. undeutlicher Sprache eine akzeptable Tonqualität erreicht wird.</p> <p>Vorhanden sein müssen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die beschrifteten Karten,</li> <li>• eine Reihe von leeren Karten,</li> <li>• Eddingstifte und Klebstoffe,</li> <li>• weiße Unterlage, evt. DIN A0 – Papier,</li> <li>• 4 digitale Bildkameras,</li> <li>• 4 digitale Filmkameras mit entsprechenden Tapes,</li> <li>• Namensschilder der Schüler,</li> <li>• Aufgabenstellung für die Schülergruppen,</li> <li>• Beobachtungsbögen mit Zeitverlauf, Aktivitätsskala, Schülernamen, und freier Spalte für zusätzliche Begriffe.</li> </ul>
<b>Auswertung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Schülermaps werden mit einer Referenzmap verglichen unter Anwendung der Methode von Novak &amp; Gower (1984). Gezählt und bewertet werden aufgeschriebene Begriffe und Propositionen. Die Transkription des Filmmaterials und die Dokumentation des Beobachters ermöglichen zusätzliche Aspekte in das Begriffsnetz einzufügen, die nicht in schriftlicher Form vorliegen, aber in der Gruppendiskussion genannt worden sind. Angenommen wird, dass möglicherweise die Schüler mehr und weitgehender diskutieren als die jeweils erstellten Concept-Maps es vermuten lassen.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Auswertung des Datenmaterials muss von den Beobachtern gegengelesen und ggf. ergänzt werden (vgl. Anhang C 167 – C 176), so dass durch die Perspektive eines Dritten die Vertrauenswürdigkeit der Datenanalyse erhöht wird (Altrichter &amp; Posch 1998 S. 166).</li> <li>• Zum Vergleich liegen die Untersuchungsergebnisse der Gruppe KSN vor (vgl. Anhang C 178 – C 197).</li> </ul>
--	--

### **Untersuchungsablauf mit dem softwareunterstützten Instrumentarium**

Im Rahmen von 36 Unterrichtsstunden haben die Schülerinnen und Schüler des Leistungskurses KSN den Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ eigenständig nach den gleichen Materialien wie die Gruppe HOF erarbeitet.

Parallel zum Unterricht haben die Schülerinnen und Schüler an einem achtstündigen Tauchkurs teilgenommen. Zur Leistungsüberprüfung wurde von jeder Gruppe eine Langzeithausaufgabe zu den Lernstationen angefertigt und von allen Schülern eine Klausur geschrieben, die sich auf die Inhalte von drei Lernstationen aufbaute und identisch mit der Klausur der Gruppe HOF war.

Neu war, dass die Gruppe KSN zusätzlich mit einem interaktiven Simulationsprogramm gearbeitet hat, das die Gleichgewichtseinstellung auf der Teilchenebene zeigt und von der CHIK – Homepage heruntergeladen werden konnte. Während der Stationenarbeit wurde in einer Einzelstunde allen Kursteilnehmern die Möglichkeit gegeben, Gleichgewichtseinstellungen nach definierten Störungen softwareunterstützt zu simulieren.

16 Wochen nachdem der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erarbeitet worden war, haben die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe erhalten, in Gruppenarbeit ein Concept-Map zum Lernzyklus zu erstellen. Eine Wiederholung über sich wechselseitig beeinflussende Gleichgewichte oder andere Fachinhalte im Rahmen der Säure – Base – Chemie fand vorher nicht statt. Nach der Unterrichtseinheit ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wurden die Inhalte zur ‚Elektrochemie‘ in der herkömmlichen Unterrichtsorganisation erarbeitet. Es ist davon auszugehen, dass das in den Concept-Maps präsentierte Wissen im Rahmen des Lernzyklus erworben wurde ohne wiederholt zu werden. Das Erstellen der Begriffsnetze erfolgte softwareunterstützt. Die Schüler sind im Erstellen von Begriffsnetzen geübt. Softwareunterstützt<sup>58</sup> haben sie bisher ein Concept-Map zur Wiederholung energetischer Aspekte erstellt.

---

<sup>58</sup> Die geeignete Software wurde freundlicherweise von der Fa. Manet® als Prerelease für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt.

## Untersuchungsablauf der Gruppe KSN mit dem softwareunterstützten Instrumentarium

<b>Ziel der Untersuchung</b>	Untersucht werden soll, <ul style="list-style-type: none"> <li>• in welchem Umfang sich Schüler an die Inhalte zum Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erinnern und</li> <li>• welches Wissen ihnen zum chemischen Gleichgewicht zur Verfügung steht.</li> </ul>
<b>These</b>	Im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erarbeitetes, multiperspektivisch erworbenes Wissen erhöht die Akzeptanz <sup>59</sup> des Chemieunterrichts und führt zu einem strukturierten und anschlussfähigen Wissen, das nach vier Monaten verfügbar ist und zur Erklärung des Phänomens ‚Hyperventilation‘ genutzt werden kann.
<b>Zeitpunkt: 15.02.02</b> <b>9:40 – 11:15 Uhr</b>	Vier Monate nach der Erarbeitung des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ erhalten die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe, in Gruppenarbeit ein Concept-Map zum Lernzyklus zu erstellen.
<b>Aufgabenstellung</b>	Thema: Hyperventilation <u>Kurzinformationen zum Phänomen</u> Hyperventilieren ist aus verschiedenen Gründen möglich. Entspricht der pH – Wert des Blutes nicht mehr der Norm, da eine Stoffwechselstörung vorliegt, kann hektisches Ein- und Ausatmen die Folge sein. Hyperventilieren können Sie aber auch, um damit Ihren Atemreiz zu unterdrücken. Genutzt wird dieses nicht selten von Tauchern, die vor dem Tauchgang durch verstärktes Ein und Ausatmen gezielt ihre individuelle Tauchzeit verlängern.
<b>Erstellen eines Begriffsnetzes mit Hilfe einer softwareunterstützten Strukturlegetechnik</b>	Die 14 Schüler und Schülerinnen bilden vier Gruppen zu drei bis vier Schülern. Jede Gruppe erhält die gleiche Kurzbeschreibung des Phänomens ‚Hyperventilation‘. Zur Charakterisierung des Phänomens stehen 10 Begriffe zur Verfügung, die auf Karten vorgegeben sind. Es handelt sich in zufälliger Reihenfolge um folgende Begriffe, Phänomene und Terme: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Säureabgabe ins Blut,</li> <li>2. Erhöhung der Atemfrequenz,</li> <li>3. Pufferkapazität,</li> <li>4. Gleichgewichtslage,</li> <li>5. MWG,</li> <li>6. Le Chatelier Prinzip,</li> <li>7. Löslichkeit von CO<sub>2</sub>,</li> <li>8. pH – Werterniedrigung,</li> <li>9. Konzentration von Hydrogencarbonat,</li> <li>10. <math>\frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)} = \frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{CO}_2)}</math>.</li> </ol> Jede Gruppe erstellt ihr Concept-Map mit Hilfe einer softwareunterstützten Strukturlegetechnik, die von der Fa. Manet® für die Untersuchung zur Verfügung gestellt wurde. Das Programm besteht aus drei Modulen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• das Konfigurationsmodul zur Eingabe von Begriffen und Verknüpfungen,</li> <li>• das Konstruktionsmodul zur Konstruktion von Netzen</li> <li>• und das Analysemodul zum Vergleich der Netze.</li> </ul> In die graphische Bedienungsfläche des Konfigurationsmoduls sind zuvor von der Untersuchungsleiterin die o.g. zehn Begriffe und 15 zur Auswahl stehende Verknüpfungen eingegeben worden, die damit im Konstruktionsmodul den Probanden zur Verfügung stehen.

<sup>59</sup> Zur Akzeptanz zählen Kompetenz- und Autonomieempfinden, aktualisiertes Interesse, Einschätzung der Unterrichtsorganisation

	<p>Folgende Verknüpfungsauswahl liegt vor, wobei die Reihenfolge zufällig ist:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. bewirkt</li> <li>2. beeinflusst</li> <li>3. bestimmt</li> <li>4. erniedrigt</li> <li>5. kompensiert</li> <li>6. erhöht</li> <li>7. beschreibt</li> <li>8. erklärt</li> <li>9. trifft Vorhersage über</li> <li>10. hat zur Folge</li> <li>11. verschiebt</li> <li>12. verursacht</li> <li>13. verändert</li> <li>14. stört</li> <li>15. wird mathematisch beschrieben</li> </ol> <p>Anmerkungen</p> <p>Jede Gruppe arbeitet nur im Konstruktionsmodul. Wird die Netzkonstruktion von den Schülern aufgerufen, erscheinen auf dem Bildschirm die zehn nebeneinander angeordneten, beschrifteten Karten, die verschoben und miteinander verknüpft werden können. Das Verschieben der Karten erfolgt durch die Operation „drag“ &amp; „drop“. Sollen zwei Karten verknüpft werden und wird eine davon angeklickt, erscheint ein Kreuz auf der Karte. Es kann eine Linie zwischen den zwei ausgewählten Karten gezogen werden. Für die Beschriftung der Verknüpfungslinie erscheint ein Feld, aus dem die jeweilige Verknüpfungsart ausgewählt werden kann. Die Richtung der Verknüpfung ergibt sich aus der mit der Maustaste gewählten Richtung der Linienführung. Die Beschriftung erfolgt nach Auswahl aus dem Menü automatisch. Durch Anklicken lassen sich die Verknüpfungslinien entfernen. Zwischen zwei Karten kann nur eine Verknüpfung hergestellt werden.</p>
<p><b>Hinweise zur Softwarebenutzung</b></p>	<p><u>Bedienungsanweisung zur softwareunterstützten Begriffsnetzerstellung</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Öffnen Sie, nachdem Sie das Programm aufgerufen haben, den Ordner ‚Netze‘.</li> <li>2. Wählen Sie auf der Symbolleiste das zweite Symbol von rechts ‚Testpartnernetz‘ an.</li> <li>3. Damit wird ein neues Testpartnernetz eingefügt.</li> <li>4. Benennen Sie das Netz mit Ihrem Gruppennamen.</li> <li>5. Rufen Sie das benannte Testpartnernetz durch Doppelklick auf. Auf dem Bildschirm erscheinen zehn nebeneinander geordnete Karten mit vorgegebenen Begriffen.</li> <li>6. Das Verschieben der beschrifteten Karten erfolgt durch ‚drag and drop‘.</li> <li>7. Um zwei Karten miteinander zu verbinden, klicken Sie eine der beiden Karten an. Es erscheint in der Mitte der Karte ein kleines, ausgefülltes Rechteck.</li> <li>8. Befindet sich die Maus auf dem kleinen Rechteck, verschwindet das Rechteck und ein Kreuz erscheint.</li> <li>9. Ziehen Sie mit gedrückter Maustaste eine Linie zwischen den Karten.</li> <li>10. Für die Beschriftung der Linie erscheint ein Menü, aus dem Sie auswählen können.</li> <li>11. Nach der Auswahl ist die Verknüpfung beschriftet.</li> <li>12. Entfernen des Pfeils: Klicken Sie die Pfeillinie an und betätigen Sie die <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">Entf</span>-Taste.</li> </ol>

<b>Dokumentation der Beobachtungen</b>	<p>Die vier Gruppen - HOF, KSN, ADA, KOC - befinden sich in unterschiedlichen Räumen. Die Aktivität der Schüler wird jeweils von einem Beobachter mit Hilfe einer Aktivitätsskala von 1 – 5 im Zeitverlauf erfasst und protokolliert.</p> <p>Während des Concept-Mappings erfolgt vom Beobachter eine verbale Mitschrift, die Angaben enthält über</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die Begriffe, mit denen das Netz begonnen wird.</li> <li>• Begriffe, die in ihrer Bedeutung ungeklärt bleiben und daher zufällig angeordnet und verknüpft werden.</li> <li>• Aussagen, die gelegt werden und sogar richtig sein können, ohne dass der sachlogische Zusammenhang verstanden worden ist.</li> <li>• Gleichungen, die möglicherweise zusätzlich auf Papier geschrieben werden und zur Erklärung dienen.</li> </ul>
<b>Zeitbedarf</b>	Für das Concept-Map ‚Hyperventilation‘ sind 30, max. 45 Minuten geplant.
<b>Vorlauf: 11.02. bis 15.02</b>	<p>Am 15.2. werden vier Beobachter benötigt, die vorher in ihre Aufgaben eingewiesen werden müssen.</p> <p><b>Vorhanden sein müssen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disketten für die Erstellung der Testpartnernetze,</li> <li>• ein Referenznetz,</li> <li>• Aufgabenstellung für die Schülergruppen,</li> <li>• leere DIN A 4 – Blätter und Stifte für jede Gruppe,</li> <li>• Beobachtungsbogen mit Zeitverlauf, Aktivitätsskala, Schülernamen und mit freier Spalte für die Mitschrift des Beobachters,</li> <li>• Tonbandgerät mit Mikrofon und Stativ.</li> </ul>
<b>Gruppendiskussion</b>	<p>Direkt nach der Erstellung der Concept-Maps erfolgt eine Gruppendiskussion, die zur Absicherung der Aussagen im Concept-Map dient. Die vier Gruppen stellen zu Beginn der Diskussion kurz ihr Concept-Map vor.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die verbalen Erläuterungen dienen einerseits dazu, missverständliche Aussagen im erstellten Concept-Map zu klären;</li> <li>• andererseits bieten die verbalen Erläuterungen aber auch die Chance zu erkennen, an welchen Stellen zufällige Aussagen im Map gemacht werden, die nicht das Wissen der Gruppe widerspiegeln.</li> </ul> <p>In der Gruppendiskussion werden jeweils zwei Teilgruppen zusammengefasst - ADA, HOF und KSN, KOC. Während die Teilgruppen ADA/HOF ihre Maps vorstellen und diskutieren, beantworten die anderen Teilgruppen KSN/KOC einen Fragebogen zum Concept-Mapping.</p> <p>Der Diskussionsleiter ist der jeweilige Beobachter in der Gruppe. Das Gespräch wird in jeder Teilgruppe als Tonbandaufnahme mitgeschnitten.</p> <p>Leitfragen zur Gruppendiskussion:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mit welchen Begriffen haben Sie begonnen, das Begriffsnetz zu legen?</li> <li>2. Wie ging es dann weiter?</li> <li>3. Welche Zusammenhänge fielen Ihnen leicht? Woran lag das nach Ihrer Meinung?</li> <li>4. Wo hatten Sie Schwierigkeiten? Welche Gründe fallen Ihnen dafür ein?</li> <li>5. Was ist bei Ihnen ungeklärt geblieben?</li> <li>6. Welche Aussagen haben Sie in Ihrer Gruppe nach dem Zufallsprinzip gelegt? Was</li> </ol>

	waren die Gründe dafür?
<b>Auswertung</b>	<p>Die erstellten Netze werden im Analysemodul der benutzten Software analysiert. Es erfolgt sowohl eine Einzelanalyse wie auch ein Vergleich zwischen den Probandennetzen und dem Expertennetz. In der Einzelanalyse werden formale Kriterien des Netzes wie</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die Anzahl der Verknüpfungen,</li> <li>• ihr Verhältnis zu der Anzahl der insgesamt möglichen Verknüpfungen</li> <li>• und die Anzahl der verknüpften Teilnetze erfasst.</li> </ul> <p>Beim Vergleich zweier Netze wird als Index der Korrespondenzkoeffizient errechnet.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dazu werden als Übereinstimmung die Propositionen gewertet, die in beiden Netzen gleich benannt und gleich ausgerichtet sind.</li> <li>• Das Programm sieht des weiteren vor, den Korrespondenzkoeffizienten zu gewichten, je nachdem, ob im Referenznetz viele oder wenige Verknüpfungen vorliegen. Ist das Referenznetz beispielsweise sparsam verknüpft, dann hat eine richtige Verknüpfung im Probandennetz eine hohe Aussagekraft, im umgekehrten Fall eine geringe.</li> </ul> <p>Die Tonbandaufnahmen der Gruppendiskussionen werden transkribiert. Erhofft wird, dass die verbalen Aussagen</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. missverständliche Zuordnungen im Map erklären.</li> <li>2. Aufschlüsse liefern über die Kenntnisse <ul style="list-style-type: none"> <li>• zur wechselseitigen Beeinflussung der Kohlensäuregleichgewichte im Rahmen des Kontextaspektes ‚Hyperventilation‘,</li> <li>• zur mathematischen Beschreibung der Gleichgewichte,</li> <li>• zur Prognose der Gleichgewichtslage nach erfolgter Störung,</li> <li>• zur Pufferlösung und ihrer Effizienz.</li> </ul> </li> <li>3. Rückschlüsse zulassen auf möglicherweise fachimmanente Verständnisschwierigkeiten.</li> </ol> <p>Die Auswertung des Datenmaterials wird von den Beobachtern und Diskussionsleitern gegengelesen und ggf. ergänzt.</p>

#### 4.4.4 Auswertungsverfahren mit dem *Paper – and – pencil - Instrumentarium*

In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Auswertung von Concept-Maps veröffentlicht (Ruiz - Primo & Shavelson 1996 S. 569 - 600, Stoddart Abrams, Gasper & Canaday 2000 S. 1228-1229, Fischler & Peukert 2000 S.23 - 49).

In einem häufig verwendeten Bewertungsverfahren, das von Novak & Gower (1984) entwickelt wurde, wird die Anzahl der verwendeten Begriffe und Relationen sowie die Anzahl der richtigen Propositionen ausgezählt. ‚Richtig‘ bedeutet, dass die Aussage mit der Expertenmeinung übereinstimmt.

Eine Methode, die sich prinzipiell davon unterscheidet, ist der Vergleich zwischen der Netzstruktur eines Expertennetzes mit der eines Probandennetzes. Das Verfahren beruht auf der Annahme, dass es zu dem untersuchten Wissensgebiet nur eine Variante gibt, die die komplexen Zusammenhänge optimiert darstellt. Die Concept-Maps der Probanden werden daran gemessen, wie ähnlich sie der Referenzstruktur sind.

Bevorzugt wird zur Zeit bei der Erstellung von Concept-Maps ein Mix aus beiden Verfahren (Fischler & Peukert 2000). Dabei werden die Aussagen in den Propositionen je nach Forscherteam nach unterschiedlichen Kategorien bewertet. In der von Stoddarts et al. (2000 S. 1228 – 1229) veröffentlichten Untersuchung werden die Propositionen nach fachsystematischer Richtigkeit beurteilt, zusätzlich aber auch danach, ob sie umgangssprachlich formuliert sind oder ob ihr Aussagegehalt einfach oder komplex ist.

Hucke und Fischer (2000 S. 76) bewerten die Begriffsnetzverbindungen im Hinblick auf die mit der Darstellung verbundenen kognitiven Leistung und wählen für diese Kategorie drei Qualitäten: abstrakt, deskriptiv und nicht unterscheidbar.

Die Vielfalt der Methoden, die zur Auswertung von Concept-Maps beschrieben werden, lässt den Schluss zu, dass eine geeignete Bewertungsmethode vom jeweiligen Untersuchungsgegenstand abhängt. Wie bei der Erstellung von Concept-Maps fehlt auch bei den Auswertungsverfahren eine standardisierte Form, da jeder Untersuchungsgegenstand einer anderen Bewertungsmethode bedarf, die dann den qualitativen und quantitativen Bewertungsmaßstab bestimmt.

### **Eingesetztes Verfahren mit dem Paper – and – pencil – Instrumentarium in der Gruppe HOF**

Auch in dieser Untersuchung werden die Propositionen bewertet. Die Bewertung erfolgt einerseits numerisch, andererseits qualitativ. Ausgezählt wird die Anzahl der Verknüpfungen der vorgegebenen und selbst gewählten Begriffe. Qualitativ bewertet werden die Propositionen mit Hilfe von zwei Kriterien ‚fachwissenschaftlich korrekt‘ und ‚umgangssprachlich formuliert‘. Es handelt sich um das niedrigste Messniveau mit dem jeweils auf Gleichheit oder Ungleichheit unterschieden werden kann.

‚Fachwissenschaftlich korrekt‘ und ‚umgangssprachlich formuliert‘ sind zwei Bewertungen, die die fachwissenschaftliche Aussagequalität der Propositionen beschreiben und zur Kategorie ‚Wissenschaftlichkeit‘ gehören. Die zweite Kategorie, die zur Bewertung mit herangezogen wird, bezieht sich auf den inhaltlichen Zusammenhang der Propositionen. Stehen die aufeinanderfolgenden Propositionen in einer schlüssigen Beziehung? Oder folgt die durch Pfeilrichtung vorgegebene Ereigniskette dem Kausalitätsprinzip? Diese Fragen werden gestellt, wenn nach dem inhaltlichen Zusammenhang der aufeinanderfolgenden Aussagen im Begriffsnetz sortiert wird.

Für die Bewertung wird ein Referenznetz erstellt. Es handelt sich dabei um ein von der Lehrerin angefertigtes Musternetz, das schon zur Zeit der Erstellung der Gruppenmaps vorliegt, und den Beobachtern während der Maperstellung der Schüler zur Verfügung steht.

Die Transkription des Filmmaterials und die Dokumentation des jeweiligen Beobachters ermöglichen es, zusätzliche Aspekte in das Begriffsnetz einzufügen, die nicht in schriftlicher Form vorliegen, aber in der Gruppendiskussion während der Maperstellung genannt worden sind. Die Annahme, dass möglicherweise die Schüler mehr und weitgehender diskutieren als das erstellte Begriffsnetz es vermuten lässt, hat sich in dieser Untersuchung bestätigt.

Die fachwissenschaftliche Bewertung der Schülermaps wird ergänzt bzw. korrigiert durch Aussagen aus den Beobachtungsbögen und der Filmtranskription. Da es auf den fachwissenschaftlichen Informationsgehalt ankommt, werden keine Sprachauffälligkeiten im Wortprotokoll festgehalten (vgl. Mayring 1999 S.70 – 73). Die Auswertung des Filmmaterials ist von den Beobachtern gegengelesen und ggf. ergänzt worden, so dass durch die Perspektive eines Dritten die Vertrauenswürdigkeit der Datenanalyse erhöht wird (vgl. Altrichter & Posch 1998 S. 166).

Um eine größere Vergleichbarkeit der Begriffsnetze untereinander zu gewährleisten, werden die verbalisierten Propositionen jedes erstellten Maps nach inhaltlichen Kategorien geordnet. Es handelt sich um folgende vier Ordnungskriterien:

- Hyperventilation
- Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte
- Pufferlösung und Pufferkapazität
- MWG und Le Chatelier Prinzip.

Die in Sprache gefasste und nach inhaltlichen Kategorien geordnete Form des Referenzmaps wird graphisch umgesetzt, in die alle von den Schülern geäußerten Propositionen integriert werden können. Alle Aussagen, die zur Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte und zur Hyperventilation gehören, finden sich in einer Referenzstruktur, alle Aussagen zur Pufferlösung und zur Pufferkapazität in einer zweiten und alle Aussagen zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip in einer dritten. An den Pfeilen werden die Nummern der verbalisierten Aussagen der einzelnen Maps notiert, die der Aussage in der nach inhaltliche Kategorien entwickelten Referenzstruktur entsprechen. Alle Gruppenmaps finden sich in den drei Referenzstrukturen wieder.

Das eingesetzte Auswertungsverfahren besteht also aus folgenden Schritten, die anschließend genauer erläutert werden sollen:

1. Es wird ein Lehrermap als sogenanntes Expertenmap erstellt. Das Expertennetz wird verbalisiert, nach definierten inhaltlichen Kriterien neu geordnet und in drei neue Referenzstrukturen umgesetzt (vgl. Anhang C 148, C 149 – C 150, C 151, C 152 – C 154).

2. Die Begriffsnetze der Schüler werden verbalisiert, durch Filmaussagen ergänzt und kategorisiert (vgl. Anhang C 24 – C 35, C 56 – C 68, C 89 – C 101, C 129 – C 143).
3. Die nach inhaltlichen Kriterien geordnete Form der aufbereiteten Schüleraussagen werden in die drei neu entwickelten Referenzstrukturen eingetragen (vgl. Anhang C 36 – C 38, C 69 – C 71, C 102 – C 105, C 144 – C 146).

#### **4.4.4.1 Datenaufbereitung des Expertenmaps**

Das Expertenmap wird vom Lehrenden erstellt, der sich in das Untersuchungsthema eingearbeitet hat. Im vorliegenden Fall handelt es sich um die Untersuchende selbst. Sie erstellt ein Referenzmap, das mit einer Musterlösung vergleichbar ist und alle Propositionen enthält, die ihr im Hinblick der zu erreichenden Lehrziele wichtig erscheinen. Es handelt sich um 29 Propositionen, deren Abfolge einerseits von der Positionierung der Begriffe im Map, andererseits aber auch vom kausalen Zusammenhang der Aussagen untereinander beeinflusst wird. Im Referenznetz sind zu den zehn vorgegebenen Begriffen noch sechs weitere Begriffe enthalten. Die meisten Begriffe sind mehrfach verknüpft, so dass das Referenzmap eine mehrfach vernetzte Struktur aufweist.

##### **Datenaufbereitung 1 (vgl. Anhang C 149 – C 150)**

Die Nummerierung der Pfeile im Lehrermap entspricht der Nummerierung in der Datenaufbereitung 1, in der die im Lehrermap dargestellten Propositionen verbalisiert sind. Die Nummerierungen der Aussagesätze der Datenaufbereitung 1 erhalten zusätzlich den Großbuchstaben L, um Unterscheidungen von anderen Nummerierungen zu ermöglichen. Die Datenaufbereitung 1 enthält eine zweite Tabelle, in der alle benutzten Begriffe und ihr jeweiliger Verknüpfungsgrad angegeben ist. Aufgelistet sind auch die im Map verwendeten und in Strukturformeln geschriebenen Gleichgewichte.

##### **Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 151) <sup>60</sup>**

In der Datenaufbereitung 3 des Lehrermaps (Datenaufbereitung 2, die zusätzlich aufbereitetes Filmmaterial enthält, findet sich nur bei den Schülermaps) werden die Aussagesätze der Datenaufbereitung 1 nach vier inhaltlichen Kategorien geordnet und neu nummeriert. Inhaltskategorien sind:

- Zur Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte,
- Zur Hyperventilation,
- Zur Pufferlösung und Pufferkapazität,
- Zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip.

---

<sup>60</sup> Die Datenaufbereitung 2 fehlt, da beim Expertenmap die Filmaufnahme entfällt.

Um die Lesbarkeit zu erleichtern und Missverständnisse auszuräumen, sind im Vergleich zur Originalfassung in der Datenaufbereitung 3 Wörter ergänzt oder weggelassen worden. Die Veränderungen erscheinen im Fettdruck. Als Fußnote ist die Art der Veränderung notiert.

#### **Datenaufbereitung 4 (vgl. Anhang C 152 - 154)**

Bei der Datenaufbereitung 4 des Lehrermaps handelt es sich um drei Flussdiagramme zu den inhaltlichen Kategorien:

- Zur Hyperventilation und Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte
- Zum MWG und Le Chatelier Prinzip
- Zur Pufferlösung und zur Pufferkapazität

Zwei der Kategorien aus der Datenaufbereitung 3 sind zusammengefasst worden, deshalb reduziert sich die Anzahl der Flussdiagramme auf die drei oben genannten. Im unteren Teil findet sich separat eine Auflistung der Aussagen, die in der Datenaufbereitung 3 enthalten sind, aber in den Flussdiagrammen nicht angemessen eingeordnet werden konnten. Die grafischen Darstellungen in der Datenaufbereitung 4 sind Verfahren, die der Datenreduktion dienen.

#### *Beispiel*

Das Flussdiagramm enthält die Aussagenfolge:

- Eine bewusst erhöhte Atemfrequenz wirkt ein auf das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid.
- Daraus folgt: Der Partialdruck von  $\text{CO}_2$  fällt.
- Daraus folgt: Die  $\text{CO}_2$  – Konzentration im Blut fällt.

Dieser konsekutiven Abhängigkeit sind folgende Aussagen im Lehrermap zugeordnet:

- Die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  (aq) beeinflusst die Gleichgewichtslage (3 )<sup>61</sup>
- die Gleichgewichtslage von  $\text{CO}_2$  (g)  $\rightleftharpoons$   $\text{CO}_2$  (aq)
- und die Gleichgewichtslage von  $\text{CO}_2$ (aq) + 2  $\text{H}_2\text{O}$ (l)  $\rightleftharpoons$   $\text{HCO}_3^-$  (aq) +  $\text{H}_3\text{O}^+$  (aq) (4)
- Bewusst gesteuerte Hyperventilation erniedrigt die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  (aq). (16)
- Die Erhöhung der Atemfrequenz erniedrigt die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  (aq). (1)
- Die Erhöhung der Atemfrequenz bei bewusst gesteuerter Hyperventilation entspricht einer Störung im Säure – Base – Haushalt. (13, 14)

---

<sup>61</sup> Die in Klammern gesetzte Zahlen entsprechen den Nummern der Propositionen in der Datenaufbereitung 3 des Expertennetzes.

#### 4.4.4.2 Datenaufbereitung eines Schülermaps als Beispiel

##### **Datenaufbereitung 1 (vgl. Anhang C 24 – C 26, C 57 – C 60, C 90 – C 94, C 130 – C 135)**

Die auf Makulaturpapier erstellten Schülermaps werden von der Lehrerin in eine word-Datei übertragen. Um Übertragungsfehler zu vermeiden, ist jeder Schülergruppe zum Vergleich ihr Originalmap und das in einer Datei erfasste Dokument vorgelegt worden. Fehler wurden behoben, so dass davon auszugehen ist, dass das von den Schülern in der aktuellen Situation erstellte Map und die von der Lehrerin angefertigte Kopie in ihrem Aussagewert identisch sind.

Alle Verbindungen werden nummeriert, verbalisiert und die in Sprache umgesetzten Propositionen werden in einer Tabelle aufgelistet. Wenn Wörter ergänzt oder weggelassen werden, um die Lesbarkeit der Aussagesätze zu erhöhen, sind diese in Klammer gesetzt und fett kursiv gekennzeichnet. Die Datenaufbereitung 1 des Schülermaps enthält ebenso wie die Datenaufbereitung 1 des Lehrermaps neben den verbalisierten Propositionen auch eine qualitative Bewertung nach vier Kategorien. Es handelt sich um die Kategorien *Wissenschaftlichkeit*, *Sprachform* und *schlüssige Zuordnung zur vorangegangenen bzw. zur nachfolgenden Aussage*. Aufgelistet werden zusätzlich alle Begriffe im Originalmap und ihre Verknüpfungshäufigkeit sowie die verwendeten Gleichungen in der Strukturformelschreibweise.

In einem zweiten Schritt wird das Filmtranskript (vgl. Anhang C 3 – C 14, C 40 – C 50, C 73– C 83, C 106 – C 123) von der Untersuchenden darauf hin gesichtet, ob einerseits zusätzliches Wissen geäußert wird, das sich nicht im Begriffsnetz widerspiegelt und ob andererseits die im Map missverständlichen und falschen Aussagen während des Concept-Mappings richtig formuliert werden. Die Korrektheit der Aussagen wird zunächst von der Untersuchenden beurteilt.

Bei der Zusammenführung der gelegten Concept-Maps und der Filmaussagen muss nach den Gütekriterien der qualitativen Sozialforschung gewährleistet sein, dass das Verfahren nachvollziehbar ist und dass verschiedene Personen, die das Verfahren nachvollziehen, zu ähnlichen Einschätzungen kommen. Daher werden alle Abweichungen zwischen Film- und Concept-Map - Aussagen in einer Tabellenspalte dokumentiert. Ergänzend zu der fachwissenschaftlichen Beurteilung der Propositionen im gelegten Map wird die in Schriftsprache umgesetzte Filmäußerung dazu gefügt und zusätzlich von der Untersuchenden kommentiert, so dass der Unterschied zwischen gelegter Aussage und im Film vorhandener Aussage deutlich wird.

Die Auswertung des Films dient dazu, Aussagen zu extrahieren, die entweder die verbalisierten Aussagen im Map ergänzen oder ersetzen. Dabei werden falsche Verbindungen im Schülermap bei der weiteren Datenaufbereitung nicht berücksichtigt oder ersetzt. Ist die aus dem Film extrahierte Aussage korrekt, die im Map hingegen falsch, wird die Aussage aus dem Film gewählt. Die Untersuchende geht davon aus, dass im Film zu den einzelnen Propositionen Geäußertes eher dem Wissen entspricht, das in der Gruppe konsensfähig war. Aufgrund dieser Annahme werden daher

die Aussagen im Film zur Bewertung herangezogen und nicht die verbalisierten Propositionen, wenn sich ein Widerspruch zwischen den Aussagen im Map und im Filmtranskript zeigt.

Die verbal formulierten Propositionen werden nummeriert. Die Nummerierung entspricht der Nummerierung im Schülermap und wird im Unterschied zur Nummerierung in der Datenaufbereitung 1 des Lehrermaps mit dem Großbuchstaben S ergänzt. Die ausgewählten Aussagen aus dem Filmtranskript werden ebenfalls in der Regel fortlaufend nummeriert und mit dem Großbuchstaben T versehen.

**Tabelle 45: Exemplarische Dokumentation der Datenaufbereitung 1 - Concept-Map k1 (vgl. Anhang C 24)**

	<b>Aussage</b>	<b>fachwissenschaftliche Bewertung</b>	<b>Ergänzungen aus dem Filmtranskript</b>	<b>umgangssprachlich formuliert</b>	<b>im schlüssigen Zusammenhang zur vorangegangenen Aussage</b>	<b>im schlüssigen Zusammenhang zur nachfolgenden Aussage</b>
S11	Le Chatelier Prinzip nach Konzentration von $c(\text{HCO}_3^-)$ sinkt (vgl. Concept-Map k1, S. 197)	missverständlich formulierter Zusammenhang	<p><b>T1:</b> „Erhöhte Atemfrequenz bedeutet nach dem Le Chatelier Prinzip: <math>\text{CO}_2</math> wird stärker abgeatmet. Dadurch wird Hydrogencarbonat ...verbraucht“ (Anhang C k1, Transkription, S. C 10).</p> <p><b>T7:</b> „Le Chatelier Prinzip ist: ...wenn eine Störung kommt, z.B. wenn der Druck erniedrigt wird, (<b>wird</b>) der Störung entgegengewirkt“ (Anhang C Transkription k1, T., S. C 6).</p> <p>T. definiert das Le Chatelier Prinzip korrekt und wendet es auf das Löslichkeitsgleichgewicht und die Kohlensäuregleichgewichte an.</p> <p><b>T1 und T7 zählen.</b></p>	nein	ja	nein Begründung: keine nachfolgende Aussage in der Wirkungskaskade

An dieser Stelle des Verfahrens ist die Sicht eines unbeteiligten Beobachters gefragt. Die Auswertung des Filmmaterials und die Bewertung der Schüleraussagen wird im Sinn der Triangulation nicht allein von der Untersuchenden vorgenommen. Auswertungen und Bewertungen werden von den Beobachtern dieser Untersuchung, Herrn HDB und Frau ADA, gegengelesen. Die Überprüfung der Transkription fand am 23.8.01 mit HDB ADA und HOF statt. Den Beobachtern wurden missverständliche Äußerungen aus den einzelnen Schülermaps vorgelegt. Die Filmszenen, aus denen die Untersuchende die zur Bewertung herangezogenen Aussagen entnommen hat, wurden kontrolliert. Dazu wurde etwa 30 % des Filmmaterials zur Überprüfung und Bewertung herangezogen. Es fanden insgesamt sieben Korrekturen in der Transkription statt (vgl. Anhang C 167 – C 176). Die von den beiden Gutachtern vorgenommenen Veränderungen in der Transkription

der Filme führten abgesehen von einer Ausnahme zu keinen wesentlichen Sinnverschiebungen. Damit waren die Bewertungen nahezu übereinstimmend.

Die Datenaufbereitung 1 enthält weiterhin die im Schülermap verwendeten Begriffe und ihren Verknüpfungsgrad sowie formulierte Gleichgewichte. Des Weiteren liegt die Anzahl der richtigen und falschen Propositionen vor (vgl. Anhang C 25 – C 26, C 60, C 93 – C 94, C 134 – C 135).

Auch für das externalisierte Wissen der Schüler gilt, dass es mehrfach im Rahmen dieser Untersuchung übersetzt wird. Die Propositionen des Originalsmaps werden in verbale Aussagen überführt und in der Datenaufbereitung 1 zusammengestellt.

**Datenaufbereitung 2 (vgl. Anhang C 27 – C 34, C 61 – C 67, C 95 – C 100, C 136 – C 140)**

In der Datenaufbereitung 2 werden in einer Tabelle den nummerierten Aussagen des Lehrermaps die entsprechenden Aussagen im Schülermap zugeordnet. Da der Aufbau der Schülermaps sich grundsätzlich vom Referenznetz unterscheidet - denn nur 10 Begriffe sind vorgegeben und neue Begriffe können hinzugewählt werden mit Relationen, die frei wählbar sind - enthalten Schülermaps Aussagen, die nicht im Referenznetz vorhanden sind. Umgekehrt enthält das Referenznetz Aussagen, die nicht im Schülermap als Propositionen vorliegen. Das Verfahren ist so gewählt, dass zunächst aus den Schüleraussagen die ausgewählt werden, die inhaltlich mit den Lehreraussagen übereinstimmen. Dann wird mit Hilfe des Filmtranskripts geprüft, welche Aussagen zu den Referenznetzvorgaben passen. Die Filmaussage ergänzt entweder die verbalisierte Proposition, so dass sie inhaltlich mit der Lehrermapaussage übereinstimmt, oder es wird, falls eine entsprechende Schülermapaussage fehlt, die entsprechende Filmaussage der Referenzaussage zugeordnet und damit wie eine verbalisierte Proposition behandelt.

In einer vierten Spalte der Tabelle wird der Zusammenhang zwischen Lehreraussage und Schüleraussage kommentiert. Die Bewertung erfolgt in einem einfachen Skalenniveau mit der Unterscheidungsmöglichkeit ‚richtig‘, ‚zum Teil richtig‘ und ‚falsch‘. Die Bewertung der Schüleraussage anhand der Referenznetzvorgabe wird von den Beobachtern geprüft. Zur Verfügung standen die Filmszenen, die entsprechenden Übersetzungen im Transkript und die Bewertung der Untersuchenden anhand der Referenzmapaussagen. Es wurden keine Veränderungen vorgenommen.

Die Datenaufbereitung 2 enthält zusätzlich eine Auflistung, aus der ersichtlich ist, wie viele Aussagen im Lehrermap und Schülermap identisch sind, wie viele Aussagen im Schülermap vorhanden sind, aber im Lehrermap fehlen, und wie viele Aussagen nur im Lehrermap enthalten sind.

**Tabelle 46: Ausschnitt aus der Datenaufbereitung 2 von Gruppe k2 (vgl. Anhang C 142)**

Aussagen im Lehrermap	Aussagen im Concept-Map k2	Aussagen in der Transkription k2	Kommentar	Bewertung
L.29: Bewusst gesteuerte Hyperventilation erniedrigt die Löslich-	Es liegen keine Aussagen vor.	T7: „Nee, Löslichkeit von CO <sub>2</sub> wird erniedrigt. Durch eine hohe Atemfrequenz, dadurch	Die Aussage im Referenzmap und die Filmaussage werden als übereinstimmend	richtig

keit von CO <sub>2</sub> (aq).		wird die Konzentration von Hydrogencarbonat erniedrigt, wenn man Carbonat herauslässt“ (vgl. Anhang C Transkript k2, M. C 110).	eingeschätzt.	
Nicht im Lehrermap				
	<b>S8:</b> pH – Erniedrigung bewirkt (einen) Atemreiz			richtig

### Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 35, C 68, C 101, C 143)

In der Datenaufbereitung 3 werden alle Aussagen kategorisiert und nach vier Ordnungskriterien eingeteilt. Die Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte, ihre Beschreibung durch Gesetzmäßigkeiten, die Effizienz der Pufferlösungen und die physiologischen Auswirkungen, die sich in der Hyperventilation zeigen, sind die vier Kategorien, nach denen die verbalisierten Aussagen aus Concept-Map und Film sortiert und erneut nummeriert werden.

Wendet man diese Methode für die Aussage S11 im Concept-Map k1 an (vgl. Tabelle 45), bedeutet das Folgendes: Die verbalisierte Proposition 11 fällt weg. Dafür zählen die Aussagen T1 und T7 im Film. Die wiederum werden überführt in die Aussage: ‚Die Konzentration von c(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sinkt bei erhöhter Atemfrequenz nach dem Le Chatelier Prinzip‘. Sie findet sich unter der Kategorie ‚Zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip‘ unter der Nummer 22 (vgl. Anhang C 35, Tabelle 47 S. 192). Die Aufbereitung der Aussagen wird ebenfalls von den Beobachtern gegengelesen.

Die Datenaufbereitung 3 ist exemplarisch dokumentiert anhand von 7 Schüleraussagen der Gruppe k1 zur inhaltlichen Kategorie ‚Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte‘.

Tabelle 47: Ausschnitt aus der Datenaufbereitung 3 von Gruppe k1 (vgl. Anhang C 35)

Zur Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte	Aussage
1. Störung ist Erhöhung der Atemfrequenz.	S1
2. Erhöhung der Atemfrequenz bewirkt geringer ( <i>einen geringeren</i> ) CO <sub>2</sub> – Druck.	S 14
3. Geringer CO <sub>2</sub> – Druck ( <i>bedeutet</i> ) Erniedrigung ( <i>der</i> ) Löslichkeit von CO <sub>2</sub> (aq).	S 15
4. Erniedrigung ( <i>der</i> ) Löslichkeit von CO <sub>2</sub> (aq), dadurch ( <i>ergibt sich infolge eine</i> ) geringere CO <sub>2</sub> – Konz. im Blut.	S 16
5. Erhöhung der Atemfrequenz beeinflusst die Gleichgewichtslage.	S 8
6. <b>Die Gleichgewichtslage von CO<sub>2</sub> (g) <math>\rightleftharpoons</math> CO<sub>2</sub> (aq) und</b>	<b>T14, 18, 5</b>
7. <b>Die Gleichgewichtslage von CO<sub>2</sub> (aq) + 2 H<sub>2</sub>O (l) <math>\rightleftharpoons</math> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (aq) + H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (aq)<sup>62</sup></b>	<b>T 14, 18,5</b>
8. Erhöhung der Atemfrequenz beeinflusst Konzentration von HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .	S2
9. Konzentration von HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> sinkt.	S3
10. <b>Bei der Hyperventilation atmest du CO<sub>2</sub> aus, damit wird der pH – Wert höher<sup>63</sup>.</b>	<b>T3, T18, T5</b>
<b>Zur Hyperventilation</b>	
11. ( <i>Eine</i> ) <sup>64</sup> geringere CO <sub>2</sub> – Konz. im Blut bewirkt späterer ( <i>einen späteren</i> ) Atemreiz.	S17
12. Späterer Atemreiz ( <i>bewirkt</i> ) zwar ( <i>eine</i> ) bessere Tauchleistung,	S18
13. späterer Atemreiz ( <i>bedeutet</i> ) aber Sauerstoffunterversorgung.	S19

<sup>62</sup> In der Originalfassung des Concept-Maps k1 finden sich die Gleichungen als zusätzliche Ergänzung.

<sup>63</sup> Keine Aussage in der Originalfassung. Die Aussage wurde aufgrund der Filmaussagen T3, 18, 5 formuliert.

<sup>64</sup> In Klammern gesetzte, fett kursiv gedruckte Wörter sind Ergänzungen zur besseren Lesbarkeit der Aussagen.

14.	Sauerstoffunterversorgung führt zur Bewusstlosigkeit.	S20
15.	<b>Ist der pH – wert zu niedrig, wird die Atemfrequenz erhöht. Hydrogencarbonat wird verabreicht, wenn der Körper nicht mehr von selbst den sauren Eintrag kompensieren kann<sup>65</sup>.</b>	T12
<b>Zur Pufferlösung und Pufferkapazität</b>		
16.	Pufferkapazität( <i>wird</i> ) bestimmt durch ( <i>das</i> ) Konzentrationsverhältnis von $c(\text{H}_2\text{CO}_3)$ und $c(\text{HCO}_3^-)$ .	S5
17.	( <i>Ist das</i> ) Konzentrationsverhältnis von $c(\text{H}_2\text{CO}_3)$ und $c(\text{HCO}_3^-)$ ungünstig, ..... ( <i>zeigt sich bei</i> ) Säureabgabe ins Blut ( <i>eine</i> ) stärkere pH – Werterniedrigung.	S6, S7
<b>Zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip</b>		<b>Aussage</b>
18.	( <i>Das</i> ) Le Chatelier Prinzip besagt ( <i>:</i> ) der Störung wird entgegengewirkt.	S10
19.	Gleichgewichtslage ( <i>wird</i> ) beschrieben durch ( <i>das</i> ) MWG.	S12, S13
20.	MWG für betreffende Reaktion ( <i>heißt:</i> ) $\frac{c(\text{HCO}_3^-) \cdot c(\text{H}_3\text{O}^+)}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)}$ (= <i>K</i> )	S13
21.	Gleichgewichtslage ( <i>ergibt sich</i> ) nach ( <i>dem</i> ) Le Chatelier Prinzip.	S9
22.	Le Chatelier Prinzip nach Konzentration von. <sup>66</sup> <b>Die Konzentration von <math>c(\text{HCO}_3^-)</math> sinkt bei erhöhter Atemfrequenz nach dem Le Chatelier Prinzip<sup>67</sup></b>	S11

#### **Datenaufbereitung 4 (vgl. Anhang C 36 – C 38, C 69 – C 71, C 102 – C 104, C 144 – C 146)**

Die Datenaufbereitung 4 des Referenznetzes wird als vorgegebene Struktur genutzt, in die die Nummern der angepassten Aussagen aus der Datenaufbereitung 3 eines jeden Schülermaps eingetragen werden. Exemplarisch liegt das Flussdiagramm von der Gruppe k1 zur inhaltlichen Kategorie ‚Hyperventilation und Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte‘ auf der nachfolgenden Seite vor. Die Nummern an den Pfeilen entsprechen der in der Datenaufbereitung 3 genutzten Nummerierung. So erscheint die Nummer 22 aus Datenaufbereitung 3 unter der inhaltlichen Kategorie ‚Zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip‘ im Flussdiagramm an dem Pfeil, der die beiden in einer Wirkungskette aufeinanderfolgenden Aussagen ‚Die  $\text{CO}_2$  – Konz. im Blut fällt‘ und ‚Die Hydrogencarbonatkonz. im Blut fällt‘ miteinander verknüpft.

Zum Vergleich aller Mapaussagen und zur Abschätzung des dokumentierten Wissens sind in Datenaufbereitung 5 alle unter einer Kategorie zu fassenden Aussagesätze der unterschiedlichen Maps zusammengefasst und in den entsprechenden Referenzstrukturen als Nummern eingetragen.

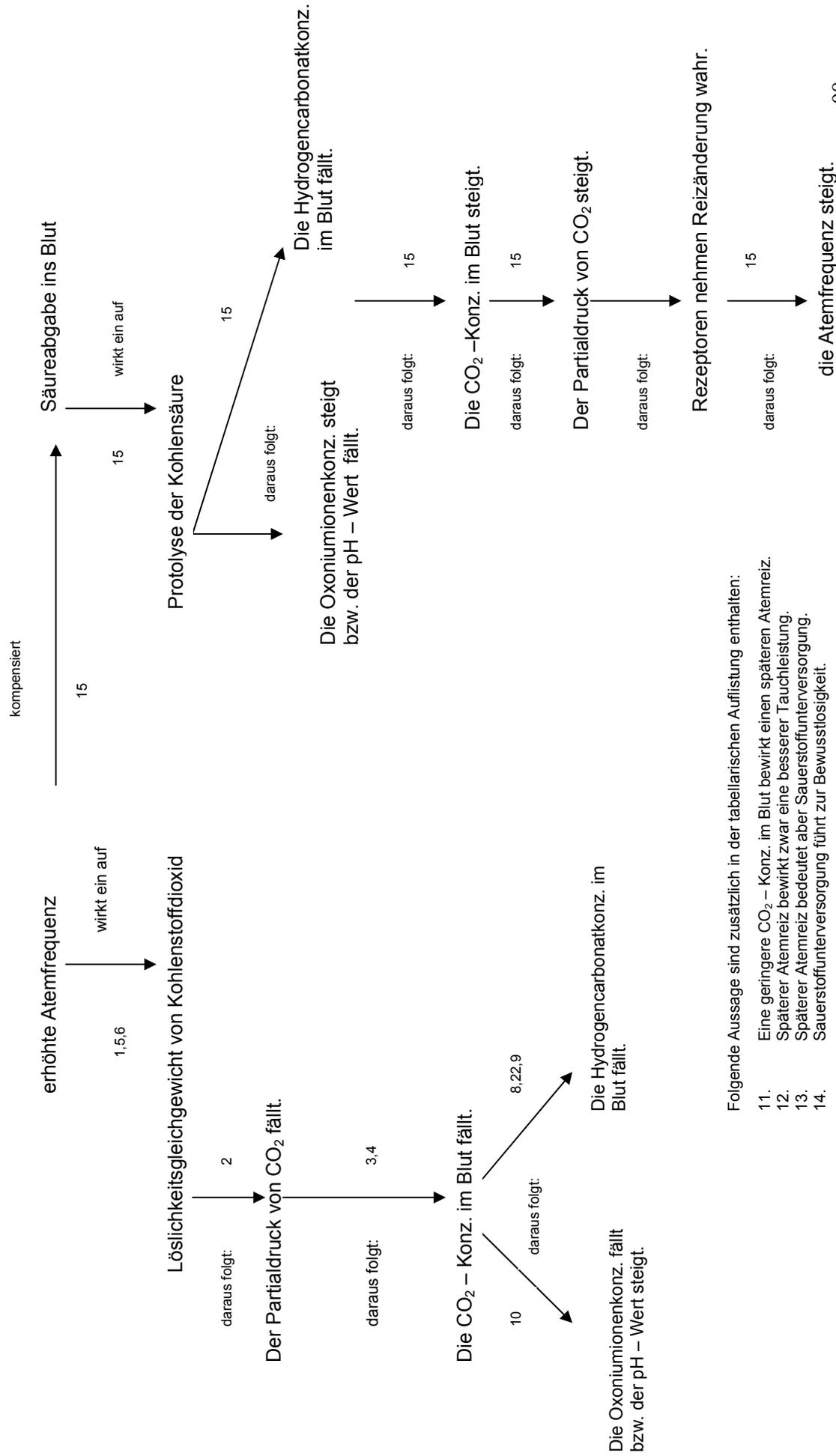
<sup>65</sup> Keine Aussage in der Originalfassung des Concept-Maps, aber im Film k1. „Du hyperventilierst, wenn er (der pH – Wert) zu niedrig ist. Deshalb gibt der Arzt auch dann Hydrogencarbonat, da der Patient das nicht mehr von selbst ausgleichen kann, damit der pH – Wert höher wird, sich einpendelt“ ( der Filmaufnahme k1, S. C8.)

<sup>66</sup> Originalfassung im Concept-Map k1

<sup>67</sup> verbesserte Aussage unter Zuhilfenahme der Transkription k1, S. C6 und S. C10 und Auswertung der Filmaufnahme, S.C14).

## Flussdiagramm der Schüleraussagen aus der Datenaufbereitung 3 (Film k1 und Concept-Map k1)

Inhaltliche Kategorien: ‚Hyperventilation und Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte‘



## **Zusammenfassung des Datenaufbereitungsverfahrens**

Das eingesetzte Aufbereitungsverfahren der Daten besteht aus folgenden Schritten:

- Erstellung eines Lehrermaps als sogenanntes Expertenmap.
- Umsetzung des Lehrermaps in eine neue grafische Referenzstruktur, die sich aus folgenden drei inhaltlichen Kategorien ergibt:
  1. Hyperventilation,
  2. Pufferlösung und Pufferkapazität sowie
  3. MWG und Le Chatelier Prinzip.
- Auswertung der Schülermaps nach vorgegebenen Kriterien:
  - ⇒ Die auf Makulaturpapier erstellten Schülermaps werden von der Lehrerin in eine word-Datei übertragen.
  - ⇒ Um Übertragungsfehler zu vermeiden, ist jeder Schülergruppe das Originalmap und das in der Datei erfasste Dokument zum Vergleich vorgelegt und nach Bedarf korrigiert worden.
  - ⇒ Alle Verbindungen werden nummeriert, verbalisiert und in einer Tabelle als Aussagesatz aufgelistet.
  - ⇒ Die Aussagesätze im Map werden durch Filmaussagen ergänzt bzw. korrigiert und nach vorgegebenen Kriterien bewertet.
  - ⇒ Die verbalisierten, mit Filmaussagen abgeglichenen Propositionen der Schülermaps werden Referenzaussagen zugeordnet und mit Hilfe einer dreigliedrigen Skala eingeschätzt.
  - ⇒ Die richtigen Schüleraussagen werden neu nummeriert und nach den folgenden inhaltlichen Kriterien geordnet:
    1. Hyperventilation,
    2. Pufferlösung und Pufferkapazität sowie
    3. MWG und Le Chatelier Prinzip.
- Eintrag der bearbeiteten Schüleraussagen in die grafischen Referenzstrukturen Hyperventilation, Pufferlösung und Pufferkapazität sowie MWG und Le Chatelier Prinzip.
- Zusammenfassung der Gruppengrafiken in einer Übersichtsgrafik.

#### 4.4.4.3 Auswertung der Datenaufbereitung – Gruppe HOF

Die Auswertung der erstellten Concept-Maps wird getrennt vorgenommen. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenfassung. Folgende Bewertungskriterien werden angewendet:

- Bei der Datenaufbereitung 1 werden im Schülernetz missverständliche und falsche Propositionen zu den falschen Aussagen gezählt, wenn im Film keine adäquate richtige Äußerung vorliegt. Ist die Filmaussage korrekt, zählt die Filmaussage.
- Bei der Datenaufbereitung 2 gilt Ähnliches. Ist die Filmaussage korrekt und die Map - Aussage missverständlich oder falsch, zählt die Filmaussage und die Schüleraussage wird als richtig bewertet. Ist die Filmaussage widersprüchlich, die Map - Aussage korrekt, zählt die Map - Aussage. Ergänzen sich beide Aussagen, werden beide Aussagen als Einheit verrechnet und als richtig bewertet.
- Im Referenznetz werden 29 Aussagen gemacht. Der Anteil der Schüleraussagen, die mit den Referenzaussagen im Einklang stehen, wird bestimmt. Die Schüleraussagen, die sich nicht im Referenznetz wiederfinden, werden herausgenommen und getrennt bewertet.
- Die Datenaufbereitung 3 enthält alle richtigen Aussagen des Schüler Maps der Datenaufbereitung 1. Sie sind nach inhaltlichen Kategorien geordnet und neu nummeriert. Sind die originalen Map - Aussagen umformuliert, da entweder die Filmaussage zählt oder die Map - Aussage und Filmaussage zusammengenommen als Einheit verrechnet wird, ist die Veränderung durch Fettschrift dokumentiert. Eine entsprechende Fußnote verweist auf den Filmausschnitt in der Transkription.
- Die Datenaufbereitung 4 besteht aus drei Flussdiagrammen, die nach den kategorisierten Referenzaussagen erstellt worden sind. In der Regel finden sich die Nummern der Schüleraussagen der Datenaufbereitung 1 an den Pfeilen des Flussdiagramms wieder. Die Aussagen, die nicht einzuordnen sind, sind zusammengefasst im unteren Teil der Grafiken.

#### Gruppe k1

Im Concept-Map k1 werden 20 Propositionen verwendet, von denen 18 richtig und zwei missverständlich bzw. falsch sind. Im Film werden missverständliche bzw. falsche Aussagen korrekt dargestellt. Da die Filmaussagen zählen, werden alle Propositionen in die Kategorie ‚richtig‘ eingeordnet. Geht man realistischer Weise davon aus, dass die Einschätzung der richtigen Aussagen um eine Aussage variiert, liegt der prozentuale Anteil der richtigen Aussagen in einem Bereich zwischen 95% und 100%.

Es werden bei der Maperstellung 19 Begriffe verwendet. Davon sind neun vorgegeben und zehn selbst gewählt. Von den vorgegebenen Begriffen fehlt die Karte  $\frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)} = \frac{c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{CO}_2)}$ . Eine der selbst

erstellten Karten ist die Karte, die den Quotienten des MWG  $\frac{c(\text{HCO}_3^-) \cdot c(\text{H}_3\text{O}^+)}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)}$  enthält. Sie zählt als

Ersatz für die nicht verwendete Karte. Das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und die Protolyse werden auf einem zusätzlichen Blatt formuliert, das dem Originalmap angeheftet ist. Ebenso liegt auf dem Zusatzblatt die Henderson – Hasselbalch – Gleichung vor. Der logarithmierte Term enthält anstatt der Konzentration der Puffersäure die Konzentration der Oxoniumionen. Im Film wird der Nenner im logarithmierten Term mit ‚Säure‘ bezeichnet (vgl. Anhang C 161). Aus den verbalisierten Propositionen im Concept-Map ist zu erschließen, dass die Puffersäure gemeint ist. Im Concept-Map sind die Begriffe vorwiegend zweifach verknüpft, was den überwiegend linearen Aufbau des Netzes verdeutlicht. Voneinander isolierte Bereiche liegen im Netz nicht vor.

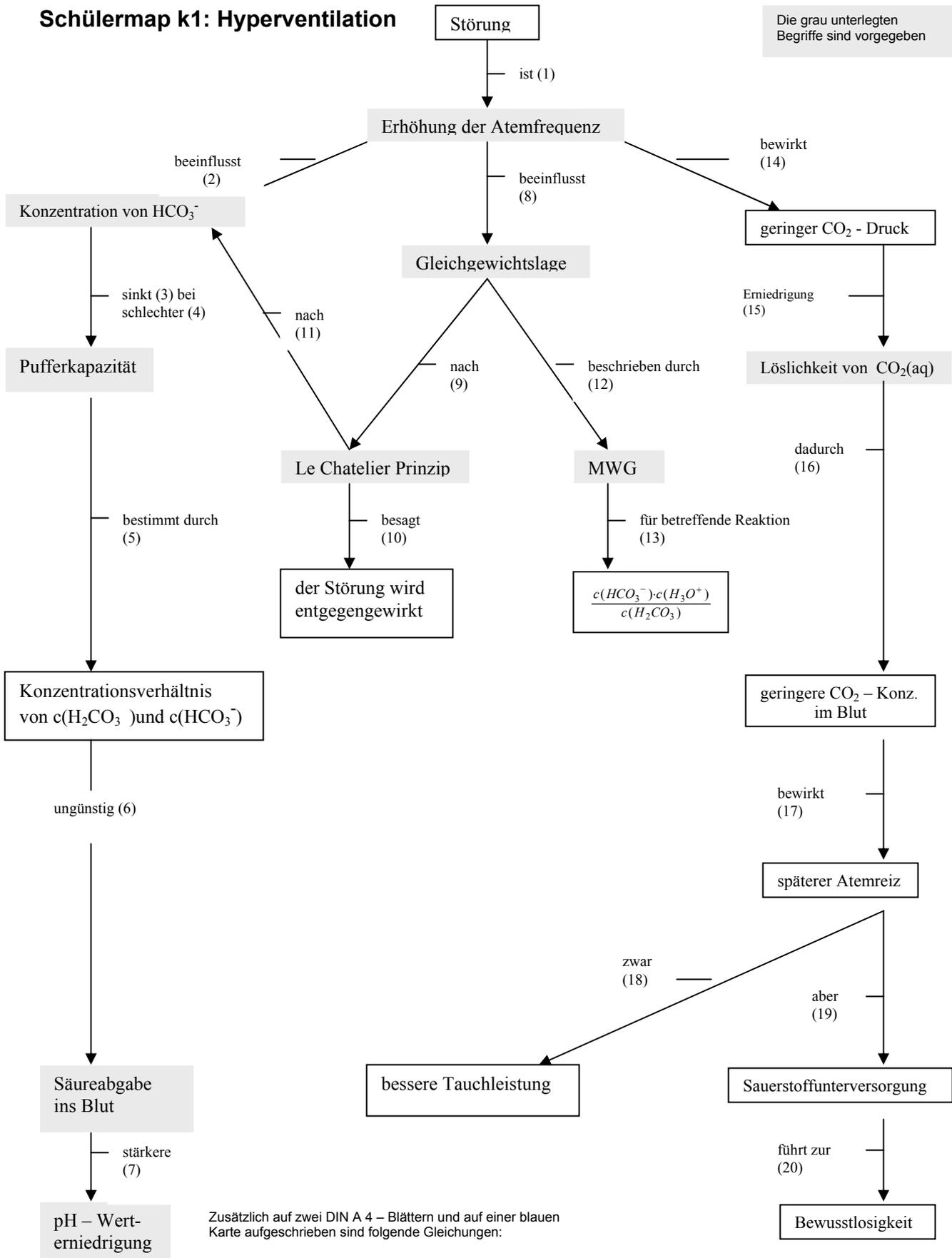
In der Datenaufbereitung 2 (vgl. Anhang C 34) sind von 29 möglichen Referenzaussagen 26 Aussagen richtig. Drei Aussagen fehlen im Schülermap und liegen nur im Referenzmap vor. Die Häufigkeit der richtigen Aussagen beträgt daher im Schülermap 89,7% mit einer realistisch einzuschätzenden Abweichung von plus/minus 3,5%. Des weiteren liegen zusätzlich vier richtige Schüleraussagen vor, die nicht im Referenznetz vorkommen.

Die Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 35) enthält 23 richtige Schüleraussagen. Dabei handelt es sich um 19 Mapaussagen und vier Filmaussagen. Alle Aussagen sind nach vorgegebenen inhaltlichen Kategorien geordnet. Vorgenommene Umformulierungen sind als Fettdruck kenntlich gemacht und mit einer Quellenangabe versehen, auf der die Neuformulierung fußt.

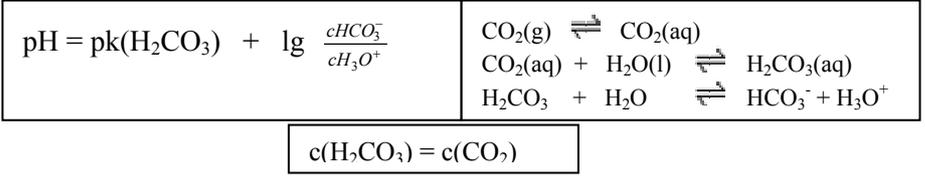
Die Flussdiagramme (vgl. Anhang C 36 – C 38), die mit den codierten Aussagen der Datenaufbereitung 3 versehen sind, zeigen deutlich, dass die Wirkungskaskade, die bei bewusst eingeleiteter Hyperventilation einsetzt, von der Gruppe fachsystematisch korrekt erfasst wird (S1, S14, S15, S 16, S8, T14, S2, S3). Zusätzliche Aussagen, die nicht im Flussdiagramm eingeordnet worden sind, erweitern den im Flussdiagramm vorgegebenen Blickwinkel über die respiratorisch bedingte Alkalose (S17 - S20). Die Folgen, die sich bei einer Acidose einstellen, die durch eine Stoffwechsellanomalie hervorgerufen wird, werden ebenso fachsystematisch korrekt von der Gruppe k1 erfasst (T12, S5, S6, S7). Die Gruppe k1 nutzt das Le Chatelier Prinzip als hilfreiches halbquantitatives Maß, um die Verlagerung des Gleichgewichtes nach einer Störung vorherzusagen (S10). Ebenso genutzt wird das MWG und seine logarithmierte Form, um die Konzentrationen der Stoffkomponenten zu prognostizieren, die dann vorliegen, wenn sich ein Gleichgewicht nach einer Störung neu eingestellt hat (S12, S13). Die Pufferkapazität wird als Systemeigenschaft aufgefasst, deren Größe vom Konzentrationsverhältnis Pufferbase zur Puffersäure bestimmt wird (S5, S6, S7).

# Schülermap k1: Hyperventilation

Die grau unterlegten Begriffe sind vorgegeben



Zusätzlich auf zwei DIN A 4 - Blättern und auf einer blauen Karte aufgeschrieben sind folgende Gleichungen:



### **Gruppe kg**

Das Concept-Map der Gruppe kg enthält 18 Propositionen, davon sind sechzehn richtig und zwei missverständlich (vgl. Anhang C 60). Im Film wird eine der beiden missverständlichen Aussagen korrekt formuliert. Da die Filmaussage zählt, sind von den 18 Propositionen 17 richtig und eine falsch. Der prozentuale Anteil der richtigen Aussagen von der Gesamtzahl der Aussagen beträgt 94% plus/ minus 6%.

Die Begriffe sind überwiegend zweifach verknüpft. Die Propositionen bilden einen Kreis, so dass die Folge einer Ereigniskette gleichzeitig als Ursache der zweiten dargestellt ist. Im Map gibt es keine voneinander isolierte Bereiche. Von den vorgegebenen Begriffen werden alle genutzt, neun weitere Begriffe dienen zur Ergänzung. Das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und die Protolyse der Kohlensäure sind als Gleichungen formuliert.

Die Datenaufbereitung 2 (vgl. Anhang C 61 – C 67) zeigt, dass es zu 23 der 29 Aussagen des Referenznetzes 23 korrekte Schüleraussagen gibt. Sechs weitere Aussagen liegen nur im Referenznetz vor. Fehlende und falsche Propositionen werden gleichbehandelt. Das bedeutet, dass 79,3% von 29 möglichen Aussagen richtig sind. Nimmt man an, dass realistischer Weise die Anzahl der richtigen Aussagen um eine Aussage variiert, bedeutet das, dass die richtigen Aussagen in einem Bereich zwischen 76% und 83% vorliegen.

In der Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 68) werden 20 korrekte Schüleraussagen kategorisiert. Es handelt sich um 17 verbalisierte Aussagen des Concept-Maps und drei Filmaussagen. Die Veränderungen, die im Abgleich mit zugehörigen Film- oder Mapaussagen vorgenommen sind, liegen im Fettdruck vor. Der Quellenbezug findet sich jeweils in der betreffenden Fußnote.

Die Flussdiagramme (vgl. Anhang C 69 – C 71), in die die Schüleraussagen als Codenummer eingetragen sind, zeigen, dass die Gruppe zum einen das Phänomen der bewusst gesteuerten Hyperventilation mit der wechselseitigen Beeinflussung der zeitgleich vorliegenden Gleichgewichte fachwissenschaftlich korrekt erklärt. Zum anderen zeigen die Flussdiagramme auch, dass die Pufferkapazität als eine Systemeigenschaft verstanden wird, durch die die nivellierenden Effekte der Pufferung quantitativ beschrieben werden. Ebenso wird das MWG als mathematisches Erklärungsmodell aufgefasst, das ein Gleichgewicht beschreibt.

### **Gruppe bz**

Die Datenaufbereitung 1 (vgl. Anhang C 93) enthält 20 verbalisierte Propositionen des Schüler-Maps. Davon sind fünf falsch oder missverständlich. Eine der falschen Aussagen wird von den Schülern nach der Map - Erstellung selbst korrigiert, was im Beobachtungsbogen von der Beobachterin Frau A. dokumentiert wurde (vgl. Anhang C 85). Zur Bewertung zählt die Korrektur der Schüler. Der prozentuale Anteil der richtigen Aussagen beträgt daher 80%.

Der Aufbau des Concept-Maps lässt sich aus dem Verknüpfungsgrad der Propositionen erschliessen. Das Netz ist kontinuierlich aufgebaut und enthält keine voneinander isolierten Teile. Die Zweifachverknüpfungen sind am häufigsten, Drei- und Mehrfachverknüpfungen liegen weniger vor. Die Anzahl der Zweifachverknüpfungen beträgt zehn, die der Mehrfachverknüpfungen vier. Daraus erschließt sich der vorwiegend lineare Aufbau des Netzes. Die vorgegebenen zehn Begriffe werden verwendet, neun weitere Begriffe hinzugewählt.

Die Formulierungen des Löslichkeitsgleichgewichtes von Kohlenstoffdioxid und der Protolyse von Kohlensäure fehlen im Schüler – Map. Im Film liegt die Formulierung der Protolyse als mündliche Äußerung vor. Ebenso fehlen im Schüler - Map zusätzliche mathematische Bezüge zum Gleichgewicht. Der Film dokumentiert, dass zwei Schülerinnen erfolgreich das MWG formulieren und in die Henderson – Hasselbalch - Gleichung umformen.

Es gibt 25 Schüleraussagen, die den 29 Referenzaussagen zugeordnet werden können, davon sind vier falsch. Vier fehlende Aussagen werden als falsch bewertet. Der Prozentsatz der richtigen Aussagen von der Gesamtzahl der möglichen Referenzaussagen beträgt damit 72,4%. Geht man davon aus, dass eine Abweichung bei der Einschätzung der richtigen Aussagen um plus/minus eine Aussage realistisch ist, so bedeutet das, dass für den Prozentsatz der richtigen Aussagen ein Bereich angegeben werden kann, der größer als 69% und kleiner als 76% ist. Es liegen zusätzlich vier Schüleraussagen vor, die nicht den Referenzaussagen zugeordnet werden können. Davon sind drei richtig. Zwei davon beziehen sich auf die besondere Qualität von Rezeptoren, die an der Kontrolle der Atemfrequenz mitbeteiligt sind (vgl. Anhang C 100).

In der Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 101) werden 16 richtige Schüleraussagen aus der Datenaufbreitung 1 und eine zusätzliche Filmaussage, die sich nicht in den 16 Schüleraussagen wiederfindet, inhaltlich kategorisiert und neu nummeriert aufgelistet. Die Aussagen 3 und 8, die den Schüleraussagen 19 und 20 in der Datenaufbereitung 1 entsprechen, wurden mit Hilfe der ergänzenden Filmaussagen umformuliert, so dass eine Einpassung in die Flussdiagramme der Datenaufbereitung 4 vorbereitet wird.

In der Datenaufbereitung 4 (vgl. Anhang C 102 – 104) erscheinen die Nummern der Schüleraussagen in der Datenaufbereitung 3 an den Pfeilen der Flussdiagramme. Deutlich wird hierbei, dass die Ereigniskette, die abläuft, wenn sich durch eine Stoffwechselanomalie der pH – Wert stark erniedrigt, nur unvollständig dargestellt wird. Hingegen ist die Wirkungskaskade, die sich einstellt, wenn bewusst hyperventiliert wird, nahezu vollständig. Es zeigt sich auch, dass ein differenziertes Detailwissen über die Besonderheit der Rezeptoren vorliegt. Unterschieden werden zwei Rezeptoren, wobei der eine auf die pH – Änderung anspricht, der andere auf die unterschiedliche Kohlenstoffdioxidkonzentration.

Die Gruppe bz hat offensichtlich Schwierigkeiten, einen sachlogischen Zusammenhang zwischen Pufferlösungen und Pufferkapazität aufzuzeigen. Deutlich sichtbar ist dies an den fehlenden Num-

merierungen im entsprechenden Flussdiagramm. Ebenso fehlen zum Le Chatelier Prinzip Erklärungen.

## **Gruppe K2**

Das Concept-Map k2 enthält 14 Propositionen, von denen acht richtig und sechs falsch bzw. missverständlich sind. Im Film werden drei missverständliche Aussagen (S14, S4, S3) korrekt dargestellt. Es zählen die Filmaussagen. Daher sind von 14 Propositionen elf richtig und drei falsch. Der prozentuale Anteil der richtigen Aussagen beträgt 78,6%. Geht man davon aus, dass die Einschätzung der richtigen Aussagen um plus/minus eine Aussage variiert, liegt die Häufigkeit der richtigen Aussagen in einem Bereich zwischen 71% und 86% (vgl. Anhang C 134).

Das Netz weist keine voneinander isolierten Bereiche auf. Die Zweifachverknüpfung dominiert. Es liegen sieben Zweifachverknüpfungen und drei Mehrfachverknüpfungen vor, was den vorwiegend linearen Aufbau deutlich macht. Von den vorgegebenen Begriffen werden neun verwendet, die Karte ‚MWG‘ fehlt. Zugewählt sind sechs Begriffe.

Das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und die Protolyse der Kohlensäure sind korrekt formuliert. Die Aggregatzustände werden nicht als Indizes dokumentiert.

In der Datenaufbereitung 2 (vgl. Anhang C 136 – 142) liegen zu 25 Aussagen des Referenznetzes Schüleraussagen vor, die entweder als Propositionen im Schüler Map enthalten sind oder als Filmaussagen existieren. Von den 25 Aussagen sind vier falsch und 21 richtig. Vier Aussagen liegen nur im Referenznetz vor. Die fehlenden Schüleraussagen werden in die Kategorie ‚falsch‘ eingeordnet. Die Häufigkeit der richtigen Aussagen im Vergleich zu den möglichen Aussagen beträgt 72,4%. Geht man wiederum davon aus, dass die Einschätzung der Aussagen um plus / minus eine Aussage variiert, liegt die Häufigkeit der richtigen Aussagen in einem Bereich zwischen 69% und 76% (vgl. Anhang C 142).

16 richtige Schüleraussagen unterschiedlicher Herkunft - acht stammen aus dem Map und acht aus dem Film – werden nach inhaltlichen Kategorien in der Datenaufbereitung 3 (vgl. Anhang C 143) neu sortiert. Die Aussagen 6 und 12 liegen neu formuliert im Fettdruck vor. Die Formulierung fasst die entsprechenden Aussagen im Film zusammen. Die Originalaussagen in der Transkription sind als Fußnote dokumentiert.

Die Flussdiagramme in der Datenaufbereitung 4 (vgl. Anhang C 144 – 146) verdeutlichen, dass die Gruppe das Phänomen der Hyperventilation mit Hilfe der sich wechselseitig beeinflussenden Kohlensäuregleichgewichte beschreiben kann. Sie unterscheidet zwei verschiedene Ursachen voneinander, die ein verstärktes Ein – und Ausatmen auslösen. Die Wirkungskaskade, die einer Hyperventilation vorausgeht, wenn sie durch eine Acidose hervorgerufen wird, ist ebenso präsent wie die Gleichgewichtsverlagerungen, die sich einstellen, wenn man bewusst hyperventiliert. Im Film wird zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Bewusstlosigkeit, die sich einstellen kann, wenn

durch Hyperventilation der  $\text{CO}_2$  – Partialdruck zu gering geworden ist, durch einen Sauerstoffmangel hervorgerufen wird.

Die zwei anderen Flussdiagramme zeigen, dass die Gruppe nicht auf das Le Chatelier Prinzip als prognostisches Maß für die Gleichgewichtsverlagerung, die sich nach einer Störung einstellt, zurückgreift. Ebenso wird das MWG nicht als rechnerisches Erklärungsmodell genutzt, das einerseits quantitativ die Protolyse beschreibt und andererseits das Le Chatelier Prinzip gesetzmäßig verankert.

Dagegen gelingt es der Gruppe, die Wirkungsweise des Kohlensäure / Hydrogencarbonatpuffers im Blut zu beschreiben, wenn sich der pH – Wert durch Säureeintrag erniedrigt. Defizite sind sichtbar, wenn ein sachlogischer Zusammenhang zwischen Pufferkapazität und Pufferlösungen gefragt ist.

### **Zusammenfassung der Datenauswertung (Gruppe HOF)**

Die erstellten Begriffsnetze präsentieren ein Gruppenwissen auf hohem Leistungsniveau. Der Kontextaspekt Hyperventilation wird von allen vier Kleingruppen erschlossen. Alle Gruppen verweisen auf unterschiedliche Ursachen der Hyperventilation und verdeutlichen die Auswirkungen auf die im Blut vorliegenden Gleichgewichte. Eine Ereigniskette, die durch die Änderung der Konzentration einer Stoffspezies ausgelöst wird, liegt von jeder Gruppe vor und ist schlüssig aufgebaut. Die Wirkung einer bewusst erhöhten Atemfrequenz auf das Löslichkeitsgleichgewicht von  $\text{CO}_2$  und die damit verknüpfte Erniedrigung der  $\text{CO}_2$  – Konzentration im Blut wird von allen Gruppen erkannt. Dokumentiert wird ebenfalls von allen Gruppen, dass bei Erhöhung der Atemfrequenz der Partialdruck von Kohlenstoffdioxid fällt und damit auch die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  im Blut. Da im Blut das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und das Protolysegleichgewicht der Kohlensäure zeitgleich vorliegen, reagiert das Gleichgewichtssystem auf den fallenden Partialdruck und auf die sinkende Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid, indem die Neubildung von  $\text{CO}_2$  unter Verbrauch von Oxoniumionen und Hydrogencarbonationen erhöht wird. Diese Dynamik der sich wechselseitig beeinflussenden Kohlensäuregleichgewichte unter dem Einfluss einer erhöhten Atemfrequenz wird von allen Gruppen dokumentiert (vgl. Anhang C 156).

Hyperventilation kann einerseits die Ursache für die Neueinstellung der Kohlensäuregleichgewichte sein, aber andererseits auch die Folge. Dass ein verstärktes Ein – und Ausatmen ausgelöst wird, wenn eine Acidose vorliegt, die durch eine Stoffwechselanomalie hervorgerufen wurde, wird ebenfalls von allen Gruppen dokumentiert. Den Gruppen k1, k2 gelingt es, die Wirkungskaskade nahezu vollständig zu formulieren, die dann einsetzt, wenn sich der pH – Wert im Blut erniedrigt. Die damit einher gehende Reduktion der Hydrogencarbonatkonzentration mit gleichzeitiger Erhöhung der Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  wird von beiden Gruppen formuliert. Die Atemfrequenz steigt, da der erhöhte  $\text{CO}_2$  – Gehalt von Chemorezeptoren wahrgenommen wird. Auch dieser physiologische Effekt wird von den Gruppen k1 und k2 erfasst (vgl. Anhang C 36 und C 144).

Die Ereigniskette, die sich einstellt, wenn eine metabolische Acidose vorliegt, wird von der Gruppe bz angesprochen. Die Filmaussage T12 (Transkription bz, I.C 76) weist auf den ursächlichen Zusammenhang zwischen pH – Erniedrigung und Erhöhung der Atemfrequenz hin.

Die Gruppe kg erinnert sich ebenfalls daran, dass der menschliche Körper eine stoffwechselbedingte Acidose durch eine verstärkte Atmung zu kompensieren versucht (vgl. Anhang C 43). Erinnert wird auch, dass Hydrogencarbonat als Pufferbase insbesondere dann, wenn es medikamentös verabreicht wird, den Säureeintrag nivelliert (vgl. Anhang C 46). Die Bedeutung der CO<sub>2</sub> – empfindlichen Rezeptoren wird nicht thematisiert.

Die inhaltliche Kategorie Pufferlösung und Pufferkapazität wird nur von den Gruppen kg und K1, repräsentiert (vgl. Anhang C 71 und C 38). Die Gruppen K2 und bz erinnern nicht daran, dass die Pufferkapazität die Eigenschaft einer Pufferlösung ist, die durch das Konzentrationsverhältnis von Pufferbase und Puffersäure bestimmt wird. Hingegen wird von der Gruppe k2 die Wirkung von Hydrogencarbonat als Pufferbase genannt und als Kompensation des Säureeintrages beschrieben (vgl. Anhang C 113). Erwartet war aber auch eine Aussage zur Güte der Pufferkapazität. Der scheinbare Widerspruch, der sich daraus ergibt, dass die gleiche Stoffmenge von Oxoniumionen eine unterschiedliche pH – Änderung hervorrufen kann, je nachdem, wie das Konzentrationsverhältnis von Pufferbase und Puffersäure ist, wird bei der Concept-Map-Erstellung nicht mehr von allen erinnert. Dass die Pufferkapazität durch das Konzentrationsverhältnis von Puffersäure und Pufferbase bestimmt wird, ist während der Map - Erstellung nur den Gruppen k1 und kg präsent. Im Concept-Map der Gruppe k1 liegt eine entsprechende Proposition vor. Bei der Gruppe kg gibt es keine Proposition, die die Größe der Pufferkapazität auf das Konzentrationsverhältnis von Puffersäure und Pufferbase zurückführt. Dafür gibt es eine entsprechende Filmaussage (vgl. Anhang C 42).

Das Le Chatelier Prinzip ist ein nützliches Hilfsmittel, eine Vorhersage über die Gleichgewichtskonzentrationen in einem nach einer Störung sich neu einstellenden Gleichgewicht zu machen. Zwei Gruppen - k1 und kg - erinnern sich an das Le Chatelier Prinzip (vgl. Anhang C 70 und C 37). In der Gruppe k1 wird im Concept-Map darauf verwiesen, dass bei einer Konzentrationsänderung die Teilreaktion eines Gleichgewichtes bevorzugt wird, die der Störung entgegenwirkt.

Von drei Gruppen (k1, bz, kg) wird das MWG und seine logarithmierte Form als mathematische Beschreibung des Protolysegleichgewichtes erfasst (vgl. Anhang C 157). Die Gruppe k1 formuliert als einzige im Concept-Map das MWG für das Protolysegleichgewicht der Kohlensäure. Die logarithmierte Form des Massenwirkungsgesetzes, die Henderson – Hasselbalch – Gleichung, wird in den entsprechenden Filmaufnahmen erwähnt und auf einem zusätzlichen Blatt dem Concept-Map beigefügt (vgl. Anhang C 7). Im Concept-Map der Gruppe bz liegen zwei Propositionen - (7) und (8) - vor, aus denen ersichtlich wird, dass das MWG und seine

logarithmierte Form als quantitatives Erklärungsmodell für Gleichgewichte aufgefasst wird (vgl. Anhang C 89).

Das Gruppenwissen lässt sich in einer Rangfolge bewerten. Nimmt man eine Bewertung vor, die die beteiligten Gruppen in einer Rangfolge einordnet, nimmt die Gruppe k1 die erste Stelle ein, darauf folgt die Gruppe kg, und dann die Gruppen bz und k2.

**Tabelle 48: Rankingliste der Concept-Maps**

Gruppe	Häufigkeit richtiger Aussagen bezogen auf 29 Referenzaussagen in %	Häufigkeit richtiger Aussagen bezogen auf die Gesamtzahl der Aussagen im Schüler Map in %
K1	89,7	100
kg	79,3	94
bz	72,4	80
K2	72,4	78,6

#### 4.4.4.4 Defizite im Konzeptverständnis - Facetten des Lernens und Erinnerns

Die Analyse der erstellten Begriffnetze wird am Ergebnis vorgenommen. Bezieht man den Entstehungsprozess eines kooperativ entwickelten Begriffnetzes mit ein, lassen sich Rückschlüsse auf Unterschiede im Konzeptverständnis der am Gruppenprozess beteiligten Schüler ziehen. Untersucht werden die Aussagen im Filmtranskript der Gruppe bz und der Gruppe k1.

##### Beispiel 1

Am Beispiel der wechselseitigen Beeinflussung zeitgleich vorliegender Gleichgewichte wird das unterschiedliche Konzeptverständnis an folgendem Beispiel deutlich. In der Gruppe bz diskutieren die Schülerinnen I. und L. über das dynamische Gleichgewicht. I. geht davon aus, dass das Gleichgewicht der Endzustand einer Reaktion ist. Ergänzend verdeutlicht sie, dass bei Änderung der Bedingungen das ursprünglich vorhandene Gleichgewicht gestört wird und sich ein neues Gleichgewicht mit veränderter Gleichgewichtslage einstellt. L. betont zwar mehrfach, dass sich ein Gleichgewicht einstellt, wenn beispielsweise die Atemfrequenz erhöht wird, sie scheint aber nicht zu erkennen, dass schon vor Erhöhung der Atemfrequenz ein Gleichgewicht existiert hat, allerdings ein Gleichgewicht mit anderer Gleichgewichtslage.

Dass die Veränderungen der Bedingungen zu einer Neueinstellung des Gleichgewichtes führen mit veränderten Gleichgewichtskonzentrationen, wird von L. trotz mehrfacher Hinweise von I. nicht angenommen. Ihr ist offensichtlich nicht klar, dass das Gleichgewicht der Endzustand einer Reaktion ist, wenn sich die Bedingungen nicht mehr ändern. B. bringt die unterschiedlichen Auffassungen auf den Punkt. Er stellt heraus, dass vor Änderung der Bedingung nach Auffassung von L. kein Gleichgewicht vorlag und von ihr das Gleichgewicht als eine Folge der Parameteränderung

aufgefasst wird. I. hingegen betont nach Auffassung von B., dass das Gleichgewicht als Neueinstellung eines existierenden Gleichgewichtes zu deuten ist.

- L.: „Vielleicht können wir nach Erhöhung schreiben, dass sich ein Gleichgewicht gebildet hat“.
- I.: „Der Körper reagiert auf den erniedrigten pH – Wert, damit, dass er die Atemfrequenz erhöht, um den CO<sub>2</sub> – Gehalt zu senken“.
- L.: „Die Folge ist ein Gleichgewicht“.
- I.: „Du hast ein Gleichgewicht: nur damit, dass du CO<sub>2</sub> entziehst, änderst du das Gleichgewicht“.
- L.: „Wir kommen zum Schluss dahin, dass es eins gibt“.
- I.: „Du musst vorher ein Gleichgewicht haben, damit die Säureabgabe im Blut was ändert“.
- L.: „Zum Schluss kommt doch das Gleichgewicht“.
- I.: „Zum Schluss lebt der Mensch, das ist genau so eine Folgerung“.
- L.: „Zum Schluss kommt das Gleichgewicht, zum Schluss können wir das einbringen, mit dem hier“.
- B.: „Es ist die Frage, ob wir das Gleichgewicht als Folge oder als Veränderung der Gleichgewichtslage auffassen“ (vgl. Anhang C 77).

Diese Diskussion zeigt einerseits, dass in der Gruppe konstruktiv die unterschiedlichen Auffassungen diskutiert werden, andererseits wird aber auch deutlich, dass L. an ihrem Verständnis festhält und von der konfliktorientierten Konsensfindung nicht profitiert. Möglicherweise hat L. aber auch spezielle Wissenslücken bezüglich der charakteristischen Merkmale einer Reaktion, die im Gleichgewicht endet. Nicht auszuschließen ist, dass L. an die Besonderheit eines Fließgleichgewichtes denkt.

## Beispiel 2

Ein zweites Beispiel für ein unterschiedliches Konzeptverständnis zeigt die Diskussion in der Gruppe k1. T. formuliert zu Beginn das Löslichkeitsgleichgewicht von CO<sub>2</sub>, die Hydratation von CO<sub>2</sub> zu Kohlensäure und die Protolyse der Kohlensäure auf einem DIN A 4 Blatt. Anhand der aufgestellten Gleichgewichte zeigt er die wechselseitige Beeinflussung der nebeneinander vorliegenden Gleichgewichte schlüssig auf, unter der Bedingung, dass die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> geringer wird. Er kommt zu dem Schluss, dass der pH – Wert sich erhöht, wenn man hyperventiliert.

A. argumentiert aus ihrer Erinnerung. Sie erinnert, dass der pH - Wert sinkt, wenn man hyperventiliert. Obwohl die Erklärungen von T. schlüssig sind, bleibt A. bei ihrer Meinung. Sie hält daran fest, dass der pH – Wert bei der Hyperventilation sinkt, ohne ihre Annahme fachimmanent zu begründen. A. sieht ihre Mutter als Expertin an. In der Erinnerung von A. kamen offensichtlich Mutter und Tochter zu der Überzeugung, dass bei erhöhter Atemfrequenz der pH – Wert sich erniedrigt. Ihre Mimik zeigt, dass A. von ihrer Meinung trotz schlüssiger Gegenargumente, die T. liefert, überzeugt bleibt. Dennoch ist sie sich möglicherweise unsicher, weil sie keine plausible fachsystematische Erklärung hat. Sie ist zu diesem Zeitpunkt der Map - Erstellung nicht mehr offen für schlüssige Argumente, die für eine pH – Erhöhung sprechen.

- A.: „Ich bin mir so sicher. Ich habe mich noch mit meiner Mutter unterhalten, die ist Ärztin“.
- T.: „Und die meinte, dass beim Hyperventilieren wird der pH – Wert gesenkt?“

A: „Ich weiß nicht. Lass uns anfangen zu legen“ (vgl. Anhang C 6).

A: „Ich bin mir ganz sicher, der pH – Wert erniedrigt sich“ (vgl. Anhang C 9).

T. erinnert sich an die Henderson – Hasselbalch - Gleichung, die den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen dem pH – Wert und den Konzentrationen von Base und Säure wiedergibt. Er formuliert die logarithmierte und umgeformte Form des Massenwirkungsgesetzes aus der Erinnerung, verwechselt aber die Konzentration im Nenner des logarithmischen Terms. Anstatt der Konzentration von Kohlenstoffdioxid oder der Konzentration von Kohlensäure wählt er fälschlicherweise die Konzentration von  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Er schreibt:  $\text{pH} = \text{pK}(\text{H}_2\text{CO}_3) + \lg \frac{c\text{HCO}_3^-}{c\text{H}_3\text{O}^+}$ .

T.: „Ich finde Erniedrigung nicht logisch. Wenn du viel hiervon hast, wenn das hierhin verlagert wird, hast Du viel hiervon.

Da gibt es noch eine andere Gleichung. Man nimmt den pH – Wert. Der pH – Wert wird berechnet aus dem pK ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) plus Logarithmus aus Base zur Säure. Dann siehst du, ich schreibe es auf. Das hängt von dem Verhältnis ab. Wenn du das erhöhst, wenn der Bruch groß ist, dann würde der Logarithmus von einem hohen Wert ein hoher Wert“ (vgl. Anhang C 7).

Auf der Basis der falsch formulierten Henderson – Hasselbalch - Gleichung bestätigt A. durch schlüssige Argumentation, dass der pH – Wert sinkt, wenn man hyperventiliert: Der Wert des logarithmischen Terms wird kleiner und damit auch der pH – Wert, weil der pK – Wert eine Konstante ist. Sie geht davon aus, dass bei einer Hyperventilation sich die Oxoniumionenkonzentration erhöht und nutzt ihre rechnerischen Fähigkeiten, um ihre Annahme zu bestätigen. Das Deutungsangebot, das Thomas hier in Form einer falsch formulierten Gleichung zur Verfügung stellt, wird von A. angenommen und in ihr Wissen integriert:

A: „Wenn du mehr  $\text{H}_3\text{O}^+$  hast, wird der Bruch klein, der Logarithmus ist klein, der pH – Wert ist kleiner, weil der pK – Wert konstant ist“ (vgl. Anhang C 7).

T. schließt sich zunächst der Argumentation von A. an. Beide beachten zu diesem Zeitpunkt nicht die Modellvorstellung auf der Teilchenebene. Nach dieser Vorstellung ändern sich die Stoffmengen der sich im Gleichgewicht befindlichen Teilchen bei einer Konzentrationsänderung nicht unabhängig voneinander, wie es eine nur rechnerische Betrachtung des MWG zulassen würde. Vielmehr verändern sich die Stoffmengen in eindeutiger Abhängigkeit. In der Bilanz kollidieren nur die Teilchenarten miteinander erfolgreich, die dazu beitragen, der Störung entgegen zu wirken. Auf die Hyperventilation bezogen heißt das, dass sich die Stoffmenge von  $\text{HCO}_3^-$  nur dann verringert, wenn gleichzeitig  $\text{H}_3\text{O}^+$  Ionen verbraucht werden, so dass  $\text{CO}_2$  nachgeliefert wird.

T. formuliert das MWG korrekt, diesmal nicht in seiner logarithmierten Form. Er bestätigt damit seine Aussage, die er aus der Dynamik der Gleichgewichtverschiebungen bei Erhöhung der Atemfrequenz schon zu Beginn erschlossen hat: Der pH – Wert wird beim Hyperventilieren erhöht.

T.: „Du hast weniger CO<sub>2</sub> gelöst. Das bedeutet, du hast weniger. Wenn du hyperventilierst, hast Du weniger CO<sub>2</sub> im Blut, daher hast Du weniger Ac<sup>68</sup>, der pH – Wert wird erhöht“ (vgl. Anhang C 11).

Hyperventilation wird aber auch ausgelöst, wenn der pH – Wert des Blutes unter den Normbereich abgesunken ist. Die Hyperventilation wird unter diesen Bedingungen als Gegenmaßnahme des Körpers gesehen. L. ergänzt, dass unter diesen Bedingungen auch Hydrogencarbonat von außen zugefügt wird. In diesem Zusammenhang erinnert sich A. an eine Aufgabe, die während der Arbeit an den Lernstationen gestellt wurde.

A.: „Es tut mir leid, ich glaube, da war ein Zettel, dann stand da drin der Zettel war eine Aufgabenstellung: ‚Stellen Sie sich vor, Sie kommen zur Unfallstelle, Sie sind Arzt, der Patient hyperventiliert. Sie können davon ausgehen, dass der pH – Wert weiter sinkt‘. D.h., der Patient, der hyperventiliert, hyperventiliert immer mehr, es wird immer schlimmer, d.h. er kann sich selbst nicht mehr helfen“.

T.: „Gegen was kann er sich nicht mehr helfen, gegen eine Erniedrigung? D.h. die Hyperventilation ist nur das Mittel. Der Körper macht nichts, was den Zustand verschlimmert“.

A.: „Du verstehst mich nicht“.

T.: „Doch ich weiß, was du meinst. Weil in der Aufgabenstellung steht, ‚gehen Sie davon aus, dass er sinkt, dass der pH – Wert weiter sinkt‘. Normalerweise ist es, dass die Hyperventilation wieder ausgleicht, wenn er gesunken ist, dass er dann wieder steigt. Aber in dem Fall, dass er weiter sinkt, dann nützt ihm die Hyperventilation nichts mehr. Du musst ihm was geben. Das wird bestätigt. Die Hyperventilation steigert eindeutig den pH – Wert“.

A.: „Das stimmt nicht, ich bin mir sicher. Nein, ich kann es nicht erklären“ (vgl. Anhang C 8).

A. erschließt aus der Aufgabenstellung, dass die Hyperventilation ursächlich verantwortlich für die pH – Werterniedrigung ist. T. versteht die Annahme, weist aber darauf hin, dass die Hyperventilation normalerweise eine Kompensationsmaßnahme des Körpers ist, um den pH – Wert zu erhöhen, wenn er durch anormalen Säureeintrag ins Blut stark abgesunken ist. A. lässt sich nicht überzeugen.

A. hat sich mit ihrer Mutter über das Phänomen der Hyperventilation unterhalten. Ihre Mutter ist Ärztin und wird von A. als Expertin anerkannt. Bei A. ist in Erinnerung geblieben, dass bei einer Hyperventilation der pH – Wert fällt. In der Vorstellung von A. ist die Hyperventilation die Ursache für den Abfall des pH – Wertes im Blut. T. versucht A. davon zu überzeugen, dass der pH – Wert steigt, wenn man hyperventiliert. Als Argumente benutzt er,

- dass beim Abatmen das Protolysegleichgewicht der Kohlensäure sich zugunsten der Kohlensäure verlagert, so dass Oxoniumionen verbraucht werden müssen, und er verweist auf das Le Chatelier Prinzip.
- dass bei einer Hyperventilation, die aus psychogenen Gründen erfolgt, als Soforthilfe eine Tüte dem Hyperventilierenden über den Kopf gestülpt wird, um zu erreichen, dass er ver-

---

<sup>68</sup> Thomas verwechselt Acetationen (Ac) mit Hydrogencarbonat.

mehrt Kohlenstoffdioxid einatmet, damit durch die größere Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  sich eine pH – Erniedrigung im Blut einstellt.

- dass nach dem Massenwirkungsgesetz weniger Oxoniumionen vorliegen, wenn der  $\text{CO}_2$  – Gehalt erniedrigt wird, weil der pK – Wert nur dann konstant ist, wenn die Oxoniumionen mit Hydrogencarbonationen reagieren und sich damit vermindern.

T. erklärt mit Deutungsmustern, die fachwissenschaftlich korrekt sind. Er hat offensichtlich die Deutungsangebote, die ihm in der Lernphase zur Verfügung gestellt wurden, in sein Wissenskompendium eingebaut.

Für die Untersuchende ist dies ein Beispiel dafür, dass schlüssige Zusammenhänge nicht unbedingt automatisch in die eigenen Vorstellungen integriert werden. Der Erziehungswissenschaftler Ziehe (1982 S. 191; zitiert bei Arnold 1999 S. 90) formulierte dazu treffend:

„Neues Wissen wird ‚biographisch synthetisiert‘, d.h. es wird an vorhandene Erfahrungen angepasst, umgedeutet, zurückgewiesen oder auch ‚widerständig ‚aufbewahrt‘.“

A. verknüpft alte Deutungen, die mit ihrer Biographie und ihrem sozialen Kontext verwoben sind, mit neuen Sichtweisen. Dabei bestimmen verstärkt psychologische Faktoren den Grad der Offenheit, den sie benötigt, um neue Aussagen nachvollziehen zu können. Da sie die im gemeinsamen Gespräch mit der Mutter erworbene Aussage über den Zusammenhang zwischen Hyperventilation und pH – Erniedrigung aufgrund der Fachkompetenz der Mutter als wahres Wissen im Sinne von fachwissenschaftlich richtigem Wissen ansieht, verschließt sie sich schlüssigen Argumenten und bleibt weitgehend bei ihrer Vorstellung. Möglicherweise hätte schon in der Lernphase eine visualisierte Erklärung auf der Teilchenebene geholfen, das Missverständnis über die pH – Änderung beim verstärkten Ein- und Ausatmen auszuräumen.

#### *Zusammenfassung*

Die fachlichen Missverständnisse zeigen, dass nicht allen Lernenden ein adäquates Teilchenmodell zur Verfügung stand, um die Verlagerungen zeitgleich vorliegender Gleichgewichte angemessen erklären zu können. Die Fehldeutungen lassen weiterhin vermuten, dass eine Rekonstruktion der Kriterien, die vollständig von unvollständig ablaufenden Reaktionen unterscheiden, in Einzelfällen nicht gelang.

#### **4.4.4.5 Reflexionen der Beobachter:**

##### **Rekonstruktionsprozess des Wissens in der aktuellen Situation des Concept-Mappings**

Der Prozess des Concept-Mappings wurde in allen vier Gruppen beobachtet und aufgezeichnet. Beobachter waren zwei Fachleiter aus dem Studienseminar Göttingen bzw. aus dem Studienseminar Hildesheim und zwei Referendarinnen aus dem Studienseminar Göttingen. Um die Meinungen und Einstellungen der Beobachter zu erfassen, wird eine Befragung durchgeführt. Die gewählte

Erhebungsmethode ist die Gruppendiskussion<sup>69</sup>. Im gegebenen Untersuchungsfall hat die Gruppendiskussion zum Ziel auf einer Metaebene, die Meinungen und Einstellungen der einzelnen Beobachter zum Concept-Mapping der Gruppe zu ermitteln, die jeweils beobachtet worden ist. Davon ausgegangen wird, dass die geäußerten Meinungen im wesentlichen auf die unterschiedlichen Beobachtungen in der aktuellen Situation des beobachteten Concept-Mappings zurückzuführen sind. Nicht auszuschließen sind Einflüsse, die sich aus der Gruppendiskussion ergeben (vgl. Lamnek 1995 S. 160). Die Gruppendiskussion wird mit Zustimmung der Teilnehmer aufgezeichnet und transkribiert.

In der Auswertung der Gruppendiskussion wird die Einschätzung der Beobachter geprüft, die sie über das Concept-Mapping als Wissensdiagnose im Rahmen dieser Untersuchung gewonnen haben. Die drei Beobachter fassen die komplexen, relationalen Beziehungen im präsentierten Wissen als qualitativ hochwertige Gemeinschaftsleistung auf.

HDB: „Faszinierend war, wie sich im Laufe der Stunde die Komplexität herausstellte und die Struktur entstand. Die wiederum entstand nur gemeinsam. Alle hatten Teilaspekte beigetragen. Aber den Zusammenhang haben sie nur zusammen hingekriegt“ (vgl. Anhang C 162).

ASE: „Auf jeden Fall war die Arbeit in der Gruppe für die Erstellung des Maps wichtig. Ich gehe davon aus, dass es in Einzelarbeit schwer machbar gewesen wäre. Es war immer ein hier Anfragen, da etwas Nachfragen. Es war dann der Gruppenprozess, der das vorangetrieben hat und letztlich die Erstellung gebracht hat“ (vgl. Anhang C 160).

ADA: „Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe war gut gewählt, weil es relativ lange gedauert hat, bis es bei den Schülern ‚Klick‘ gemacht hat. Wenn es zu einfach gewesen wäre, dann wären sie nach zehn Minuten fertig gewesen. Sie haben das so oft umstrukturiert.

Ich glaube nicht, dass einer das allein hingekriegt hätte“ (vgl. Anhang C 161).

HDB: „Für die Schüler hat sich die Gruppenarbeit gelohnt. Jedenfalls das, was ich in meiner Gruppe gesehen habe, war sehr schön“ (vgl. C 163 – C 164).

Da es sich beim übergeprüften Wissen vorwiegend um relationale Informationen handelt, die in der Lernphase verinnerlicht worden sind, und die gewählte Methode der Wissensdiagnose sich dazu eignet, vernetzte Zusammenhänge zu visualisieren (vgl. Eckert 1998 S. 143-145), stehen die Einschätzungen der Beobachter im Einklang mit Annahmen des Rahmenmodells, das im gedächtnistheoretischen Forschungsansatz favorisiert wird. Wenn das Gedächtnis nicht mehr vorrangig als Informationsspeicher gesehen werden kann, der nach Bedarf abgerufen wird, wenn Erinnerungen nicht nur die Erfahrungen der Vergangenheit widerspiegeln, sondern beim Erinnern in der Gegenwart etwas neu konstruiert wird, was in der Vergangenheit stattfand, dann müsste es für diese Modellvorstellung auch Hinweise geben, wenn man die Rekonstruktion von Teilwissen in der Gruppe im Rahmen der Filmanalyse nachvollzieht.

---

<sup>69</sup> Nach Lamnek ( 1995 S. 131) kann die Gruppendiskussion als Gespräch einer Gruppe von Untersuchungspersonen zu einem bestimmten Thema aufgefasst werden.

Drei von vier Beobachtern bestätigen, dass die komplexen, relationalen Beziehungen im externalisierten Wissen erst beim Legen entstanden und als Gemeinschaftsleistung zu sehen sind. Nach ihrer Einschätzung ist anzunehmen, dass die Methode des Concept-Mappings in den Gruppen K2, bz und kg hilfreich war, um die Rekonstruktion eines komplexen Wissensfundus als kooperative Leistung zu ermöglichen. Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit den Modellannahmen der *moderat konstruktivistischen Sichtweise und ihrer gedächtnistheoretischen Variante* (vgl.S. 12 - 14).

P: „Entstanden die Strukturen beim Legen oder waren sie vorab da?“ (vgl. Anhang C 162)

HDB: „Die (Strukturen) entstanden beim Legen. Das hängt doch auch damit zusammen: War etwas unklar, rupften sie wieder alles von der Platte und fingen neu an“ (vgl. Anhang C 162).

P: „Ich habe deshalb gefragt, weil bei T. sein Wissen und die Ernsthaftigkeit zwischen ihm und der Methode stand. Sein profundes Wissen hat ihn gehindert, die Stärken der Methode auszuschöpfen. Ich habe das so gesehen, dass er das, was er im Kopf hatte, das hat er visualisiert. Die Methode selber war ihm keine Hilfe“ (vgl. Anhang C 162).

HDB, ASE, ADA:

„Das habe ich anders erlebt. Da waren die Strukturen nebeneinander und nicht nacheinander“ (vgl. Anhang C 162).

Nicht für alle Schüler scheint die Arbeit in der Gruppe ein Vorteil gewesen zu sein. P. berichtet von einem Schüler in der Gruppe k1, der selbständig eine Lösungsstrategie entwickelte, und zwar nicht zeitgleich während des Legens, sondern vorher durch die Anregung der Aufgabenstellung und der vorgegebenen Begriffe.

P: „Der Junge, der dominant war, fing an, Sachzusammenhänge zu rekonstruieren. Das war wie eine Präsentation eines Lehrwerkes. Er ordnete, schob Begriffe, die anderen spielten fast keine Rolle. Es kam häufig von ihm: „Das ist doch logisch, nicht?“. Das war also nicht nur der Lehrwerkzusammenhang, Er versuchte das auch für sich in einen logischen Zusammenhang zu bringen. Da entstanden allmählich die beiden Merktzettel, auf denen er aufschrieb, wie er den Zusammenhang gerade sah“ ( vgl. Anhang C 161).

Die Wissenskonstruktion des Schülers erfolgte zunächst ohne die Kooperation mit anderen Gruppenteilnehmern. Seine Hintergrundkonzepte konnten durch den Aufgabenreiz aktualisiert werden, was sich darin zeigte, dass er zusätzliche Zettel benutzte, auf denen er Teilkonzepte<sup>70</sup> notierte. Da der Schüler gleich nach der Aufgabenstellung eigene Strukturierungshilfen visualisierte, auf die er später in Erklärungszusammenhängen zurückgreifen konnte, schien die Methode der Begriffslegetechnik als Hilfsmittel für ihn nicht nötig gewesen zu sein.

Die von Kognitionswissenschaftlern vertretene Sichtweise, dass begriffliches Wissen und die relationalen Beziehungen in kognitiven Schemata gespeichert sind, welche typische Zusammenhänge innerhalb eines Realitätsbereich repräsentieren, steht im Einklang mit der Beobachtung von P. Der Schüler T. rekonstruiert Vorwissen, strukturiert es durch Kausalitätsbezüge und ordnet es hie-

---

<sup>70</sup> Es handelt sich bei den Teilkonzepten um das Löslichkeitsgleichgewicht von Kohlenstoffdioxid und um das Protolysegleichgewicht der Kohlensäure sowie um die Henderson – Hasselbalch – Gleichung, die später von ihm noch hinzugefügt wurde (vgl Anhang C 26).

rarchisch. Der Unterschied besteht darin, dass T. ohne die sprachliche Kooperation mit den anderen zu einer hohen Qualität des rekonstruierten Wissens kommt. Ein ähnlich hohes Leistungsniveau erreichen die anderen Gruppenteilnehmer in der kooperativen Auseinandersetzung und gemeinsamen Wissensrekonstruktion (Bruhn, Fischer, Gräsel & Mandl 2000 S. 131).

Nach Einschätzung der Beobachter ist das Concept-Mapping eine Methode, die anderen wissensdiagnostischen Methoden überlegen ist.

P: „War die Methode effektiv? Es ist eine Verlangsamung. Gruppenunterricht ist immer eine Verlangsamung. Dies ist nochmals eine Verlangsamung“.

HDB: „Die Methode ist anderen Methoden sehr überlegen. Du weißt doch genau, dass nach einem viertel Jahr das Wissen, das in der Klausur abgefragt worden ist, Schnee von gestern ist“.

HDB: „I. betrachtet da zunächst mal mit einer Methode, ob das Erlernte heute noch verfügbar ist. Und da ist herausgekommen, dass das Wissen verfügbar ist und zwar im komplexen Umfang“ (vgl. Anhang C 165).

Diese aus der Beobachtung resultierende Sicht steht im Einklang mit Forschungszusammenhängen, die sich mit Wissensrepräsentationen im Gedächtnis und mit der angemessenen Ausgestaltung eines wissensdiagnostischen Instrumentariums beschäftigen. In einer von Bruhn, Fischer, Gräsel & Mandl veröffentlichte empirische Studie (2000 S. 119 – 133) wird das Concept-Map als Strukturierungshilfe verstanden, die den Prozess der gemeinsamen Wissenskonstruktion unterstützt und die Gruppenarbeit positiv beeinflusst. Nach den Befunden dieser Studie erfragen Probanden, denen eine Mapping - Technik zur Verfügung steht, mehr aufgabenrelevante Inhalte und gehen in der Diskussion mehr Konflikte ein, um ihre individuellen Perspektiven in eine gemeinsame Interpretation zu überführen. Concept-Mapping wird als innovative Methode zur Erfassung von Wissen gesehen, die nicht nur Strukturierungshilfen bietet, die im Einklang stehen mit moderat konstruktivistischen Lerntheorien. Concept-Mapping kann auch die Gruppenarbeit positiv beeinflussen und damit auch kooperatives Lernen fördern (vgl. Eckert 1998, Fischer & Mandl 2000, Fischler & Peukert 2000).

#### **4.4.5 Auswertungsverfahren mit dem softwareunterstützten Instrumentarium (Gruppe KSN)**

Die erstellten Netze werden im Analysemodul der benutzten Software NET<sup>®71</sup> analysiert. Es erfolgt sowohl eine Einzelanalyse wie auch ein Vergleich zwischen den Probandennetzen und den Expertennetzen. In der Einzelanalyse werden formale Kriterien des Netzes erfasst. So werden der Umfang des Netzes und die Verknüpfungsdichte berechnet, sowie die *Zerklüftetheit* und die *Knotenzentralität*. Die Anzahl der Verknüpfungen wird ausgedrückt im Umfang U.

---

<sup>71</sup> Netzwerk – Elaborierungs – Technik von der Fa. Manet®

Das Verhältnis der existierenden Verknüpfungen zu der Anzahl der insgesamt möglichen Verknüpfungen erscheint unter dem Index  $V$ .  $V$  kann einen Wert zwischen 0 und +1 einnehmen. Die insge

samt mögliche Anzahl von Verknüpfungen ergibt sich aus dem Quotienten  $\frac{n(\text{Begriffe}) \cdot (n(\text{Begriffe}) - 1)}{2}$ .

Die Anzahl der verknüpften Teilnetze wird ausgedrückt in der Zerklüftetheit **R** (ruggedness). Der Index kann zwischen 1 und n (Anzahl der Begriffe) liegen.

Beim Vergleich zweier Netze wird als Index der sogenannte Korrespondenzkoeffizient **C** errechnet. Je nachdem, was als Übereinstimmung gewertet werden soll, ist ein unterschiedlicher Vergleich möglich. Im einfachsten Fall werden Benennung und Richtung der Relationen außer Acht gelassen und die Verknüpfungen als ungerichtete, unbenannte Kanten zwischen den Begriffen, den Knoten, angesehen. In diesem Fall bestimmt das Programm den Koeffizienten C1. Ein strengerer Vergleich ergibt sich, wenn Relationen nur dann als übereinstimmend akzeptiert werden, wenn sie in beiden Netzwerken gleich benannt werden, wobei die Richtung nicht bewertet wird (C2). Der strengste Vergleich ergibt sich, wenn nur Relationen mit gleicher Benennung und Ausrichtung in beiden Netzen als Übereinstimmung gewertet wird (**C3**).

Zur Bestimmung der Korrespondenzkoeffizienten werden vom Programm folgende vier Parameter – p00, p11, p01, p10 - bestimmt, die am Beispiel des Korrespondenzkoeffizienten C3 dargelegt werden:

- die Anzahl der gleich benannten und gleich gerichteten Relationen, die im Testpartnernetz und Referenznetz fehlen (p00),
- die gleich benannten und gleich gerichteten Relationen, die im Testpartnernetz vorhanden sind, aber im Referenznetz fehlen (p01),
- gleich benannte und gleich gerichtete Relationen, die im Referenznetz vorhanden sind, aber im Testpartnernetz fehlen (p10)
- und gleich benannte und gleich gerichtete Relationen, die im Testpartnernetz und Referenznetz vorhanden sind (p11).

Die Berechnung von C3 erfolgt nach folgendem Term:

$C3 = \frac{p00 + p11 - (p01 + p10)}{p}$ . Die Variable p entspricht der Gesamtsumme aller möglichen

Verknüpfungen und ergibt sich bei n Begriffen aus  $\frac{n(\text{Begriffe}) \cdot (n(\text{Begriffe}) - 1)}{2}$ .

- Der Korrespondenzkoeffizient C3 kann Wert zwischen -1 und +1 annehmen, wobei +1 eine vollständige Korrespondenz beider Netzwerke ausdrückt.
- C gleich -1 bedeutet, dass ein Netzwerk das „Negativ“ des anderen Netzwerkes ist. Als Positiva gehen in die Bewertung die Variablen p00 und p11 ein.

Das Programm sieht des weiteren vor, die Korrespondenzkoeffizienten C1, C2 und C3 zu gewichten, je nachdem, ob im Referenznetzwerk viele oder wenige Verknüpfungen vorliegen. Ist das Referenznetzwerk beispielsweise sparsam verknüpft, dann hat eine richtige Verknüpfung im Probenetz eine relativ hohe Aussagekraft. Die Berechnungsvorschrift des gewichteten Korrespondenzkoeffizienten  $C_w$  wird wie folgt angegeben:

$$C_w = \frac{\frac{p1^+}{p0^+} p00 + \frac{p0^+}{p1^+} p11 - \left( \frac{p1^+}{p0^+} p01 + \frac{p0^+}{p1^+} p10 \right)}{\frac{p1^+}{p0^+} p0^+ + \frac{p0^+}{p1^+} p1^+}$$

Die Variable  $p0^+$  gibt die Summe der Nichtverknüpfungen des Probandennetzes an und die Variable  $p1^+$  die Summe der Verknüpfungen. Zum Vergleich der Netze erstellt das Programm des weiteren die Signifikanz der Korrespondenz nach einem in der Literatur üblichen Signifikanztest. Da der Wert des gewichteten Korrespondenzkoeffizienten  $C_w$  von der Anzahl der Verknüpfungen im Referenz- und Probandennetz abhängig ist, sieht das Programm vor, automatisch die Verknüpfungstendenz anzugeben. Die Verknüpfungstendenz  $Y$  ergibt sich aus dem Quotienten der Verknüpfungsdichte  $V$  des Probandennetzwerkes zur Verknüpfungsdichte  $V$  des Referenznetzwerkes.

Als Indikatoren für die Bewertung der formalen Netzstrukturen in der Gruppe KSN werden die Verknüpfungsdichte  $V$  und die Zerklüftetheit  $R$  der einzelnen Netze herangezogen. Ein großer Umfang bzw. eine hohe Verknüpfungsdichte wird als Hinweis auf einen hohen Grad an Vernetzungen von Wissensinhalten gewertet (Eckert 1998 S. 87). Der Grad der inhaltlichen Korrektheit der Netze ergibt sich über den Korrespondenzkoeffizienten in der Stufe C3. Der Korrespondenzkoeffizient C3 wird bei dieser Untersuchung gewählt, da die gleich benannten und korrekt am Referenznetz ausgerichteten Relationen deutlich machen, ob ein Sachverhalt verstanden worden ist oder nicht. Das Referenznetz wurde von KSN erstellt.

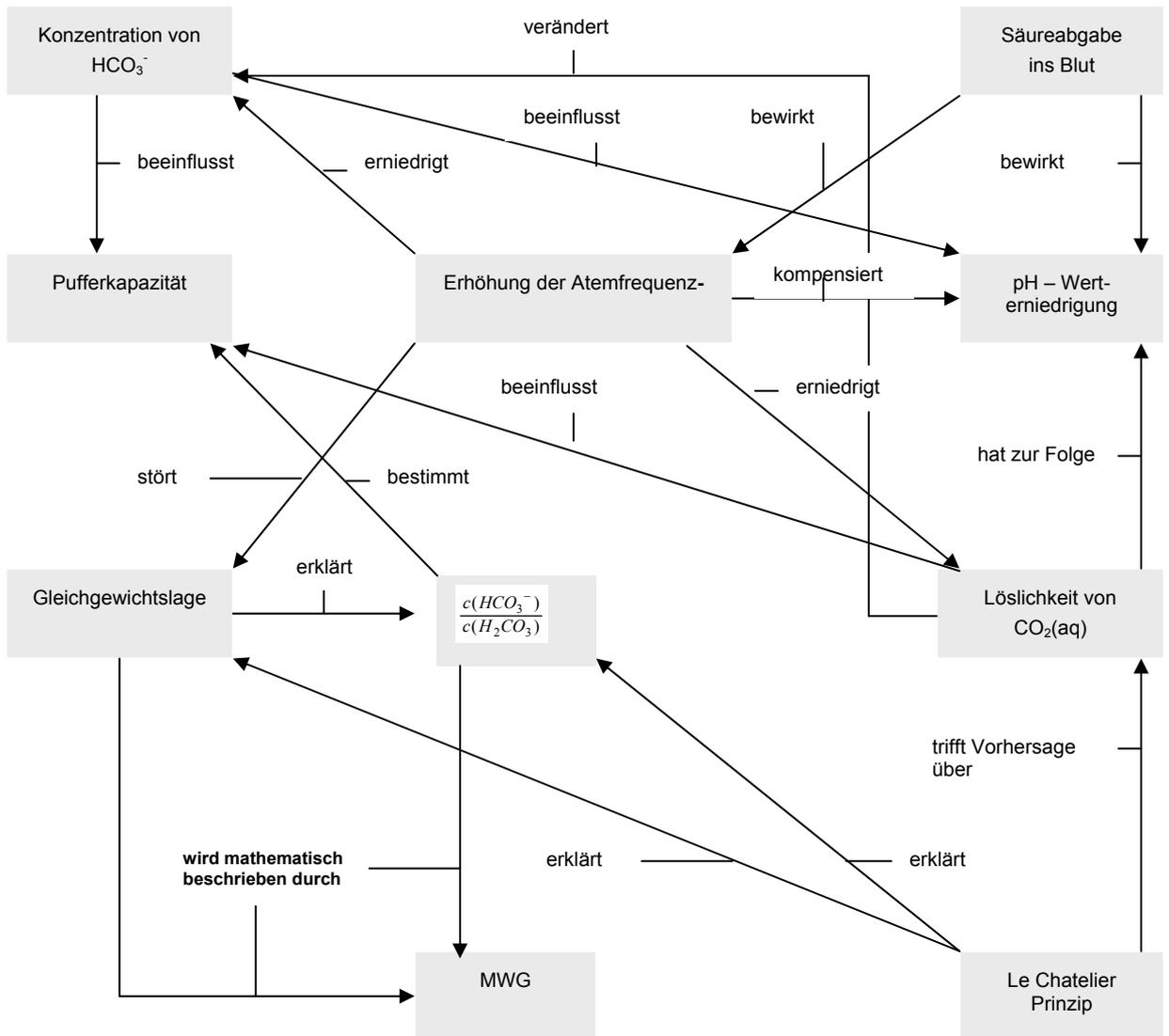
#### 4.4.5.1 Die softwareunterstützte Datenaufbereitung der Netze

Die Concept-Maps werden vor vier Gruppen erstellt. Es handelt sich um die Gruppen: *JEJC*, *SIF*, *HUGO* und *KRÜCKE*<sup>72</sup> (vgl. Anhang C 182, C 186, C 191, C 195, C 196). Das Referenznetz wird vom Lehrer KSN erstellt und trägt den Namen *Hajo* (vgl. Anhang C 196). Das Testpartnernetz wird mit dem Großbuchstaben T und das Referenznetz mit dem Großbuchstaben R abgekürzt. Exemplarisch ausgewählt wird das Netz der Gruppe *JEJC*<sup>73</sup>.

<sup>72</sup> Die Namen sind von den beteiligten Schüler und Schülerinnen selbst gewählt.

<sup>73</sup> Im Anhang C S. C 182 findet sich das Original.

## Concept-Map der Gruppe JEJC



#### 4.4.5.2 Auswertung der softwareunterstützten Datenaufbereitung

Als Indikatoren für die Bewertung der Netzstrukturen können die Verknüpfungsdichte  $V$  und die Zerklüftetheit  $R$  der einzelnen Netze herangezogen werden. Die inhaltliche Korrektheit der Netze ergibt sich über die Korrespondenzkoeffizienten. Das Concept-Map mit der größten Verknüpfungsdichte ist das Netz der Gruppe *KRÜCKE*. Dass es sich bei dem Index Verknüpfungsdichte nur um eine formale Aussage über das Netz handelt, wird an diesem Map deutlich. Das Testpartnernetz *KRÜCKE* hat zwar die höchste Verknüpfungsdichte, ist aber gleichzeitig das am schlechtesten zu bewertende Netz, vergleicht man die Korrespondenzkoeffizienten.

Ein Vergleich des Korrespondenzkoeffizienten der vier Testpartnernetze *JEJC*, *SIF*, *HUGO* und *KRÜCKE* zeigt, dass die Korrespondenzkoeffizienten in gegebener Reihenfolge abnehmen, unabhängig davon, ob es sich um C1, C2 oder C3 handelt (vgl. Tabelle 49).

Tabelle 49: Concept-Maps im Vergleich

Bewertungskriterien	Symbol	R <sup>74</sup> : HAJO	T <sup>75</sup> : JEJC	T: SIF	T: HUGO	T: KRÜCKE
Summe maximal möglicher Verknüpfungen	U <sub>max</sub>	45	45	45	45	45
Summe vorhandener Verknüpfungen	U	19	18	20	15	23
Summe in T und R fehlender Verknüpfungen	P00	26	27	25	30	27
Summe in R fehlender Verknüpfungen	P01		4	10	8	16
Summe in R fehlender Verknüpfungen, die falsch sind			1	3	6	10
Summe in R fehlender Verknüpfungen, die richtig sind			3	7	2	6
Summe in T fehlender Verknüpfungen	P10		5	9	12	12
Summe in T und R vorhandener Verknüpfungen	P11		14	10	7	7
Verknüpfungsdichte	V	0,42	0,4	0,44	0,33	0,5
Zerklüftetheit des Netzes	R	1	1	1	1	1
Korrespondenzkoeffizient	C1		0,6	0,33	0,38	0,02
Korrespondenzkoeffizient	C2		0,33	0,11	0,07	-0,24
Korrespondenzkoeffizient	C3		0,33	0,01	0,07	-0,24

<sup>74</sup> R: Referenznetz

<sup>75</sup> T: Testpartnernetz

### 4.4.5.3 Die inhaltliche Datenaufbereitung der Netze

Da im Rahmen einer Evaluation die Aussage über die Bewertung der Netzwerke als Strukturgebilde nicht ausreichend ist, sondern neben der vergleichenden Bewertung auch das konkrete Wissen interessiert, das die Struktur des Netzwerkes präsentiert, erfolgt eine inhaltliche Bewertung der Propositionen anhand ausgewählter Kategorien.

#### *Verfahren*

Die Aussagen des Referenznetzes und der Kleingruppenetze werden verbalisiert, nummeriert und in einer Tabelle einander zugeordnet. Die Bewertung der Aussagen erfolgt in einer Nominalskala, in der die Aussagen nach den Merkmalen ‚fachwissenschaftlich richtig oder falsch‘ eingeteilt werden. Die Nummern 1 – 19 enthalten Aussagen, die im Testpartnernetz und Referenznetz auftreten. Die nachfolgenden Nummern zeigen Aussagen in den Probandennetzen, die sich nicht im Referenznetz wiederfinden. Fachwissenschaftlich missverständliche oder falsche Aussagen sind fett gedruckt.

Das Netz der Gruppe *JEJC* enthält 18 Propositionen. Siebzehn davon sind richtig, eine Proposition ist falsch. Das Netz der Gruppe *SIF* enthält 20 Propositionen, 18 davon sind richtig. Die Gruppe *HUGO* hat in ihrem Netz 15 Verknüpfungen gelegt. Davon sind 7 mit dem Referenznetz identisch und von den restlichen acht Propositionen sind zwei richtig. Insgesamt liegen 9 richtige Propositionen vor.

Das Concept-Map der Gruppe *KRÜCKE* hat insgesamt 23 Propositionen, 17 davon sind richtig. Teilt man die richtigen Aussagen in zwei Gruppen auf, einerseits in die Aussagen, die sich im Referenznetz wiederfinden und andererseits in die Aussagen, die nur im Testpartnernetz auftreten, ergibt sich Folgendes für die Anzahl der richtigen Aussagen: Die Gruppe *JEJC* hat 12, die Gruppe *SIF* 10, die Gruppe *HUGO* 7 und die Gruppe *KRÜCKE* 8 Aussagen, die dem Referenznetz entsprechen (vgl. Anhang C 197- C 199).

**Tabelle 50: Anzahl der richtigen Aussagen in den Concept-Maps der Gruppe KSN**

Gruppe	Summe der Aussagen im Testpartnernetz	Summe aller richtigen Aussagen	Summe der richtigen Aussagen die den Aussagen, im Referenznetz entsprechen
JEJC	18	17	12
SIF	20	18	10
HUGO	15	9	7
KRÜCKE	23	17	8

Berechnet man die Häufigkeit der richtigen Aussagen in einem Probandennetz im Vergleich zu den vorhandenen Aussagen, ergibt sich folgende Rangliste:

Gruppe <i>JEJC</i> :	$\frac{17}{18} = 94\%$
Gruppe <i>SIF</i> :	$\frac{18}{20} = 90\%$
<b>Gruppe <i>HUGO</i>:</b>	$\frac{9}{15} = 60\%$
Gruppe <i>KRÜCKE</i> :	$\frac{17}{23} = 74\%$

Berechnet man die Häufigkeit der richtigen Aussagen bezogen auf 19 Referenzaussagen und zählt im Probandennetz fehlende Aussagen als falsch und lässt zusätzliche richtige und falsche Aussagen im Probandennetz unberücksichtigt, ergibt sich die folgende Reihenfolge:

Gruppe <i>JEJC</i> :	63%
Gruppe <i>SIF</i> :	53%
<b>Gruppe <i>HUGO</i>:</b>	37%
Gruppe <i>KRÜCKE</i> :	42%

Berechnet man die Häufigkeit der richtigen Aussagen bezogen auf 19 Referenzaussagen und zählt im Probandennetz die fehlenden Aussagen als falsch und lässt nur die falschen Aussagen im Probandennetz unberücksichtigt, wählt also die Summe aller richtigen Aussagen, ergibt sich die Reihenfolge:

Gruppe <i>JEJC</i> :	89,5%
Gruppe <i>SIF</i> :	95%
<b>Gruppe <i>HUGO</i>:</b>	47,4%
Gruppe <i>KRÜCKE</i> :	89,5%

Wählt man den im Programm berechneten Korrespondenzkoeffizienten C3 als ordnende Größe, ergibt sich die Reihenfolge:

Gruppe <i>JEJC</i> :	C3 = 0,33
Gruppe <i>SIF</i> :	C3 = 0,11
Gruppe <i>HUGO</i> :	C3 = 0,07
<b>Gruppe <i>KRÜCKE</i>:</b>	C3 = -0,24

Auffällig ist, dass bei allen Häufigkeitsberechnungen der richtigen Aussagen die Gruppe *HUGO* den letzten Platz in der Reihenfolge einnimmt, das Netz also am schlechtesten zu bewerten ist. Die im Programm berechneten Korrespondenzkoeffizienten führen zu einer Vertauschung in der Reihenfolge der Netze *HUGO* und *KRÜCKE*. Danach zeigt das Netz der Gruppe *KRÜCKE* die geringste Übereinstimmung mit dem Referenznetz und ist daher am schlechtesten zu bewerten. Der Widerspruch scheint in der Berechnung der Korrespondenzkoeffizienten zu liegen.

*Softwareunterstützte Bewertung und inhaltliche Bewertung im Vergleich, exemplarisch dokumentiert an der Gruppe JEJC:*

Die Propositionen des Referenznetzes werden verbalisiert und nummeriert. Das Referenznetz enthält 19 Propositionen.

Die 18 Propositionen des Probandennetze werden ebenfalls verbalisiert und den Referenzaussagen zugeordnet.

- P11: entspricht der Summe der Propositionen, die im Probandennetz und Referenznetz einander entsprechen und damit richtig sind. Im Fall von *JEJC* sind das 12 richtige Aussagen.
- P00: entspricht der Summe der Propositionen, die in beiden Netzen nicht auftreten. Die Summe der maximalen Verknüpfungen beträgt 45. Für das Referenznetz bedeutet das, dass 26 Verknüpfungen fehlen. Im Netz *JEJC* fehlen 27 Verknüpfungen. Von den 27 fehlenden Verknüpfungen sind aber 7 im Referenznetz enthalten. Also handelt es sich um 20 gleiche Verknüpfungen, die im Referenznetz und im Testpartnernetz *JEJC* fehlen.
- P10: entspricht der Summe der Propositionen, die **nur im Referenznetz** auftreten und im Testpartnernetz *JEJC* fehlen. Wenn 12 von 18 Aussagen im Testpartnernetz *JEJC* richtig sind, muss also die Differenz der Aussagenanzahl 7 sein. 7 Propositionen treten nur im Referenznetz auf.
- P01 entspricht der Summe der Propositionen, die **nur im Probandennetz** auftreten. Wenn 12 von 18 Aussagen dem Referenznetz entsprechen, müssen 6 Aussagen nur im Netz *JEJC* auftreten.

Für den Korrespondenzkoeffizienten C3 bedeutet das:  $C3 = 0,4$

Rechnung:

$$C3(JEJC) = \frac{12 + 20 - (7 + 6)}{45} = 0,42$$

Berechnet man für alle Gruppen nach diesem Verfahren den C3 – Wert, so ergibt sich die Reihenfolge:

Gruppe <i>JEJC</i> :	0,42
Gruppe <i>SIF</i> :	0,16
Gruppe <i>HUGO</i> :	0,11
<b>Gruppe <i>KRÜCKE</i>:</b>	<b>-0,16</b>

Die Tabelle zeigt noch einmal die Variablen für die Ermittlung des selbst berechneten C3 – Wertes und ist mit den Häufigkeiten unterschiedlich berechneter richtiger Aussagen ergänzt.

Tabelle 51: Variablen für die Ermittlung von C3 - Werten

	Symbol	JEJC	SIF	HUGO	KRÜCKE	HAJO
Summe maximal möglicher Propositionen	U <sub>max</sub>	45	45	45	45	45
Summe vorhandener Propositionen	U	18	20	15	23	19
Summe der Propositionen, die im Referenznetz und Probandennetz einander entsprechen	P11	12	10	7	8	0
Summe der Propositionen, die in beiden Netzen nicht auftreten	P00	20	16	18	11	26
Summe der Propositionen, die nur im Referenznetz auftreten, aber im Probandennetz fehlen	P10	7	9	12	11	0
Summe der Propositionen, die nur im Probandennetz auftreten	P01	6, davon 5 richtig	10, davon 8 richtig	8, davon 2 richtig	15, davon 5 falsch	19
Korrespondenzkoeffizient <small>errechnet</small>	C3 <small>errechnet</small>	0,42	0,16	0,11	<b>-0,16</b>	1
Korrespondenzkoeffizient <small>automatisch</small>	C3 <small>automatisch</small>	0,33	0,11	0,07	<b>-0,14</b>	
$\frac{\sum \text{richtiger Aussagen}}{\sum T - \text{Netzaussagen}}$		94%	90%	<b>60%</b>	74%	
$\frac{\sum \text{richtiger Aussagen, gemessen - am - R - netz}}{\sum R - \text{Netzaussagen}}$		63%	53%	<b>37%</b>	42%	
$\frac{\sum \text{richtiger Aussagen}}{\sum R - \text{Netzaussagen}}$		89,5%	95%	<b>47,4%</b>	89,5%	

#### Deutung der verfahrensabhängigen Unterschiede in den Rankinglisten

Sowohl im softwareunterstützten wie auch im *Paper – pencil – Verfahren* wird im Rahmen dieser Untersuchung das Referenznetz als Musterlösung herangezogen, um die Korrektheit der Testpartnernetze zu prüfen. Die automatische Ermittlung der Rankingliste erfordert vom Referenznetz, dass alle richtigen Antworten, die möglich sind und in den Testpartnernetzen auftreten, in der Musterlösung enthalten sind. Das Programm wertet nur die Angaben als richtig, die in der Musterlösung vorgegeben sind. Falls in der Musterlösung richtige Antworten fehlen, die in den Testpartnernetzen vorhanden sind, müssen Änderungen im Referenznetz vorgenommen werden. Wird die Änderung nicht vorgenommen, führt das zu folgenden Artefakten:

- Ist die Verknüpfung weder im Referenznetz noch im Testpartnernetz, erhöht sich der Wert des Korrespondenzkoeffizienten.
- Ist eine richtige Verknüpfung im Testpartnernetz vorhanden, fehlt sie aber im Referenznetz, vermindert sie den Wert des Korrespondenzkoeffizienten.

Eine weitere Fehlerquelle ergibt sich bei der Wahl und bei der Anzahl der Verknüpfungen. Liegen in der Vorgabe doppeldeutige Verknüpfungen vor, werden sie vom Programm als nicht übereinstimmend interpretiert, obwohl die Aussagen fachwissenschaftlich korrekt sind.

Liegen zu viele Verknüpfungen vor, so ist nach Aussage von Eckert (1998 S. 94) der  $C_w$  – Wert mit Vorsicht zu genießen. Eckert verweist auf den Koeffizienten  $Y$  im Analysemodul, der die Tendenz des Probanden ausdrückt, im Vergleich zum Experten deutlich mehr oder weniger Verknüpfungen herzustellen.  $Y$  berechnet sich aus dem Verhältnis der Verknüpfungsdichte eines Probandennetzes zur Verknüpfungsdichte des Referenznetzes. Ist der Koeffizient  $Y$  gleich 1, bedeutet das, dass sich die Verknüpfungsdichten der verglichenen Netze entsprechen.  $Y < 1$  deutet auf ein im Vergleich zum Referenznetz sparsameres Probandennetz hin. Dementsprechend spricht  $Y > 1$  für ein dichteres Netz. Ist  $Y$  weit größer als 1, so ist der  $C_w$  – Wert keine angemessene Kenngröße zur Klassifizierung der Netzgüte. Nach Angaben von Eckert steigt bei sehr großem  $Y$  – Wert die Wahrscheinlichkeit für die Positiva ( $p_{11}$  und  $p_{00}$ ), die die Berechnung von  $C_w$  bestimmen, und es fällt die Wahrscheinlichkeit für die Negativa ( $p_{10}$  und  $p_{01}$ ).

Um Fehlerquellen zu reduzieren, verlangt die automatische Berechnung des  $C_3$  – Koeffizienten eine angepasste Musterlösung, die alle möglichen und richtigen Verknüpfungen enthält, die in den Testpartnernetzen vorkommen. In der Umsetzung bedeutet das, dass im Nachhinein die Musterlösung, die im Referenznetz vorliegt, den Testpartnernetzen angepasst werden muss.

#### **4.4.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus unterschiedlichen Datenaufbereitungen (Gruppe KSN)**

Die inhaltliche Auswertung (vgl. Anhang C 197 – C 199) erfolgt in den vorgegebenen Kategorien:

- Hyperventilation - Dynamik sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte
- MWG und Le Chatelier Prinzip
- Pufferlösung und Pufferkapazität

Der Kontext Hyperventilation wird von allen Kleingruppen erschlossen. Alle Gruppen verweisen auf die Ursachen einer Hyperventilation und verdeutlichen die Auswirkungen auf die im Blut vorliegenden Gleichgewichte. Die Wirkung einer bewusst erhöhten Atemfrequenz auf das Löslichkeitsgleichgewicht von  $CO_2$  und die damit verknüpfte Veränderung des Konzentrationsverhältnisses von Kohlensäure und Hydrogencarbonat wird von zwei Gruppen (*JEJC* und *SIF*) korrekt dargestellt. Erkannt und präsentiert wird von diesen beiden Gruppen auch, dass die Erhöhung der Atemfrequenz nicht nur Ursache für die Verlagerung der Kohlensäuregleichgewichte im Blut sein kann, sondern auch Folge einer Ereigniskette, wenn eine verstärkte Säureabgabe ins Blut die Wirkung auslöst.

Die Gruppen *HUGO* und *KRÜCKE* zeigen in ihren Concept-Maps zusätzlich zu korrekten Aussagen auch falsche und missverständliche Relationen zwischen der Erhöhung der

Atemfrequenz und den Auswirkungen auf die jeweiligen Konzentrationen von Hydrogencarbonat und  $\text{CO}_2$ . Bei beiden Gruppen fehlt der ursächliche Zusammenhang zwischen einer pH – Erniedrigung und der dadurch ausgelösten Hyperventilation. Die Gruppe *JEJEC* hat neun, die Gruppe *SIF* zwölf, die Gruppe *HUGO* fünf und die Gruppe *KRÜCKE* acht richtige Aussagen zur inhaltlichen Kategorie ‚Hyperventilation und sich wechselseitig beeinflussende Gleichgewichte‘.

Von allen Gruppen wird das Le Chatelier Prinzip als ein nützliches Hilfsmittel angesehen, das eine Vorhersage über die Gleichgewichtskonzentrationen im sich neu einstellenden Gleichgewicht zulässt. Ebenso wird von allen vier Gruppen das MWG als mathematische Beschreibung einer Gleichgewichtslage umschrieben. Die Gruppe *JEJEC* hat fünf, die Gruppe *SIF* vier, die Gruppe *HUGO* drei und die Gruppe *KRÜCKE* hat sieben richtige Aussagen zum MWG und zum Le Chatelier Prinzip.

Die inhaltliche Kategorie ‚Pufferlösung und Pufferkapazität‘ wird von zwei Gruppen (*JEJC*, *SIF*) vollständig erfasst. Die Gruppe *JEJC* zeigt entsprechend des Erwartungshorizontes, dass das Konzentrationsverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlensäure die Güte der Pufferkapazität bestimmt. Die übrigen drei Gruppen umschreiben die Pufferkapazität als Systemeigenschaft, die dazu verhilft, eine pH – Erniedrigung zu kompensieren. Es fehlt dabei eine quantitative Aussage, die das Gütemaß der Pufferkapazität beschreibt. Die Gruppen *HUGO* und *KRÜCKE* zeigen in ihrem Concept-Map zu korrekten Aussagen zur Pufferkapazität auch Beziehungen auf, in denen der Begriff Pufferkapazität missverständlich oder falsch verwendet wird. Zur inhaltlichen Kategorie ‚Pufferlösung und Pufferkapazität‘ haben die Gruppen *JEJEC* und *SIF* drei bzw. zwei richtige Aussagen, die Gruppe *KRÜCKE* zwei richtige und zwei falsche und die Gruppe *HUGO* eine richtige Aussage und eine falsche.

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Die Schülerinnen und Schüler sind in der Lage, die Dynamik der sich wechselseitig beeinflussenden Kohlenstoffdioxid – Gleichgewichte kontextgebunden am Beispiel der Hyperventilation korrekt zu beschreiben.
- Sie umschreiben die Pufferkapazität als eine Systemeigenschaft, die dazu verhilft, eine pH – Erniedrigung zu kompensieren. Zum Teil rekonstruieren sie, dass die Pufferkapazität ein adäquates Maß für die Güte einer Pufferlösung ist.
- Sie wissen und dokumentieren, dass das MWG die Lage des Gleichgewichtes quantitativ beschreibt.
- Sie sehen im Le Chatelier Prinzip ein nützliches Hilfsmittel, eine Gleichgewichtslage zu beschreiben. Zwei Gruppen (*JEJEC* und *KRÜCKE*) erkennen im Le Chatelier Prinzip ein prognostisches Maß für die Lage eines Gleichgewichtes, die sich nach einer erfolgten Störung einstellt.

#### 4.4.5.5 Beobachtungen von Lehrern und Einschätzungen von Schülern

Während des Concept-Mappings nahmen die Beobachter der Gruppen ein protokollarisches Aktivitätsprofil der Gruppenteilnehmer auf. Vorgegeben war eine vierstufige Skala. Die Werte der Skala haben folgende Bedeutung:

- 1: dominant/bestimmend,
- 2: überlegt/aussagend,
- 3: sporadisch/nachfragend,
- 4: passiv/unauffällig (vgl. Anhang C 180 – C 181, C 185, C 190, C 194).

Zusätzlich gab es die Möglichkeit, die Begriffe aufzulisten,

- die ungeklärt blieben,
- die besonders leicht einzuordnen waren,
- bei denen es während des Concept-Mappings Verständnisschwierigkeiten gab.

Die nach dem Concept-Mapping stattfindende Gruppendiskussion wurde vom Beobachter der jeweiligen Gruppe geleitet und aufgenommen (vgl. Anhang C 180 – 181, C 184, C 188 – C 189, C 193). Die Diskussion war nicht offen, sondern erfolgte problemorientiert. Vorgegeben waren fünf Fragen, die möglichst angesprochen werden sollten. Die Leitfragen waren:

- Mit welchen Begriffen haben Sie begonnen?
- Welche Begriffe konnten Sie leicht in Beziehung setzen?
- Bei welchen Begriffen gab es Verständnisschwierigkeiten?
- Welche Begriffe blieben unklar?
- Welche Aussagen wurden nach dem Zufallsprinzip gelegt?

#### Gruppe KRÜCKE

Die Gruppe *KRÜCKE* gehört zu den Vielverknüpfern<sup>76</sup>. Ein Schüler der Gruppe *KRÜCKE* bestätigt dies in der Gruppendiskussion:

„Das Schwierige war, dass man jede Verknüpfung findet. Man findet erst das eine, dann das andere, aber man kommt nicht so leicht darauf. Wir wissen immer noch nicht, wie wir Le Chatelier mit der Pufferkapazität verbinden“ (vgl. Anhang C 193).

Die Gruppe beginnt mit den Karten, die einen hohen Erklärungswert haben. Es sind die Karten ‚Gleichgewichtslage‘, ‚MWG‘, ‚Le Chatelier Prinzip‘ (vgl. Anhang C 194). Das Concept-Map zeigt in der Vielzahl von Verknüpfungen auch eine Reihe von missverständlichen und falschen Zuordnungen. Entweder werden Ursachen und Folgen in einer Wirkungskette verwechselt oder umfassende Begriffe wie ‚MWG‘, ‚Pufferkapazität‘ und ‚Gleichgewichtslage‘ falsch verknüpft (vgl. Anhang C 197 – C 199). Das Beobachtungsprotokoll der Gruppe (vgl. Anhang C 194) bestätigt,

---

<sup>76</sup> (vgl. Eckert 1998 S. 94)

dass die Begriffe ‚Pufferkapazität‘ und ‚Le Chatelier Prinzip‘ in ihren Verknüpfungen unklar blieben. In der Diskussion wird dies wiederum verneint. Die Beteiligung an der Gruppendiskussion entspricht dem Aktivitätsprofil, das vom Beobachter aufgenommen wurde. Zwei Schüler werden überlegt/aussagend eingeschätzt, ein Schüler eher sporadisch nachfragend.

### *Ergebnis*

Die Gruppe *KRÜCKE* hat die meisten Propositionen im Concept-Map aufgestellt. Von 23 Aussagen sind 17 richtig. Softwareunterstütztes Concept-Mapping hat die Gruppe offensichtlich dazu verleitet, möglichst viele Verknüpfungen zu machen. Vermutlich gehen die Probanden davon aus, dass die Netzgüte primär von der Zahl der Verknüpfungen abhängt. Wird das erstellte Concept-Map nach inhaltlichen Kategorien bewertet, so ist das Netz der Gruppe *KRÜCKE* in einer Ranking Liste an vorletzter Stelle.

Eine qualitative Unterscheidung der Begriffsspezies scheint vorzuliegen. Die Gruppe beginnt mit drei Karten (‚Gleichgewichtslage‘, ‚MWG‘, ‚Le Chatelier Prinzip‘), deren Begriffe einen hohen Erklärungswert haben. Wie das Map zeigt, sind insbesondere diese Begriffe falsch verknüpft.

### **Gruppe HUGO**

Nach Aussage von F. hatte die Gruppe zunächst Schwierigkeiten mit dem, was das MWG aussagt. Auf die Frage wie diese Schwierigkeit gelöst wurde, antwortete F:

„Wir haben ein oder zwei Verbindungen dazu gezogen zu den Konzentrationen, zu den verschiedenen Konzentrationen und Gleichgewichten“ (vgl. Anhang C 188 - C 189).

Diese Antwort steht im Einklang mit der Beschreibung, wie insgesamt in dieser Gruppe vorgegangen wurde. Auf die Frage der Beobachterin nach der Vorgehensweise in der Gruppe antwortete F:

„Kärtchen angeguckt, also die verschiedenen Optionen sortiert, versucht Paare zu machen, letztendlich probiert eine schöne Verknüpfung herzustellen mit einem schönen Design“.

Im Beobachtungsbogen nachzulesen ist, dass in dieser Gruppe Schwierigkeiten bei den Begriffen ‚Pufferkapazität‘, ‚Gleichgewichtslage‘ und ‚Löslichkeit von CO<sub>2</sub>‘ auftraten. Der Schüler F. bestätigt dies im nachhinein während der Gruppendiskussion. Auf die Frage, „war alles logisch, was ihr gelegt habt?“, lautete die Antwort:

„Ja, außer vielleicht, dass die Hyperventilation die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> erhöht. Das hätte genauso erniedrigen sein können. Ich glaube trotzdem erhöhen“.

Die Aussage, dass die Hyperventilation die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> erhöht, liegt im Concept-Map vor. Sie ist fachlich nicht korrekt. Ebenso fehlen die Auswirkungen, die eine Säureabgabe ins Blut auf die Hydrogencarbonatkonzentration und auf die pH – Wertänderung hat. Neben vier fachlich nicht korrekten Aussagen in Wirkungsketten enthält das Concept-Map auch zwei falsche Verknüpfungen mit den beiden eher erklärenden Karten ‚Gleichgewichtslage‘ und ‚Pufferkapazität‘ (vgl. Anhang C 197 – 199).

Das Aktivitätsprofil im Zeitverlauf des Concept-Mapping, welches von der Beobachterin aufgenommen wurde (vgl. Anhang C 190), zeigt, dass der Schüler F. sich während der ganzen Zeit dominant und bestimmend zeigte. Der Schüler B. wird eher sporadisch nachfragend eingeordnet und der dritte Schüler O. passiv unauffällig beschrieben. In der Gruppendiskussion bleibt die im Aktivitätsprofil beschriebene Einteilung.

### *Ergebnis*

In dieser Dreiergruppe wird das Concept-Map vorwiegend von einem Schüler erstellt. Die anderen sind kaum beteiligt. Die Wissenskonstruktion des Schülers erfolgt ohne die Kooperation mit anderen Gruppenteilnehmern. Die vorgegebenen Begriffe werden als Strukturierungshilfe für die Lösung der Aufgabe genutzt. Eine Sortierung der Begriffe nach unterschiedlicher Qualität fehlt. In der Einzelleistung zeigen sich missverständliche und zum Teil falsche Zusammenhänge zwischen den erklärenden Karten und den Karten, die Vorgänge beschreiben. Wird das Netz nach inhaltlichen Kategorien bewertet, so findet sich das Netz der Gruppe *HUGO* an letzter Stelle.

### **Gruppe SIF**

In der Gruppe *SIF* war die Erstellung des Concept-Maps ein klassischer Gruppenprozess. Alle waren engagiert beteiligt und nach Aussage des Beobachters in einer ernsthaften Diskussion verstrickt (vgl. Anhang C 185). Im Aktivitätsprofil werden die Gruppenteilnehmer nahezu gleich eingeordnet. Nachzulesen ist, dass die Gruppe zunächst über mögliche Zusammenhänge der Karten ohne Berücksichtigung der Verknüpfungsmöglichkeiten diskutierte. Nach 20 Minuten waren bis auf drei der Begriffe einfach verbunden. Der Beobachter vermerkt, dass der Begriff ‚Pufferkapazität‘ der letzte Begriff war, der verbunden wurde. Die Begriffe wurden in folgender Reihenfolge gelegt: ‚Säureabgabe ins Blut‘, ‚Erhöhung der Atemfrequenz‘, ‚Gleichgewichtslage‘, ‚MWG‘, ‚Le Chatelier Prinzip‘, ‚Löslichkeit von CO<sub>2</sub>‘, ‚pH – Werterniedrigung‘, ‚Konzentration von Hydrogencarbonat‘, ‚Konzentrationsverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlensäure‘.

Als Begründung für die Kartenwahl zu Beginn gibt ein Schüler an, dass die Begriffe gewählt worden sind, die am leichtesten erschienen.

„Das, woran man sich erinnerte, war das, was man im Unterricht hatte, was man auf Anhieb wusste“  
„Gleichgewicht war auch das Thema, Erhöhung der Atemfrequenz, Hyperventilation und die übergeordneten Begriffe waren einfacher“ (vgl. Anhang C 184).

Auf die Frage, bei welchen Begriffen es Verständnisschwierigkeiten gegeben habe, antwortete A.:

„Wir konnten uns nicht mehr genau erinnern. Wir mussten erst versuchen, das zu rekonstruieren, um darauf zu kommen. Wir wussten nicht mehr ganz genau, was ‚Le Chatelier‘ war. Im Großen und Ganzen wussten wir es. Es war immer so, dass es uns eigentlich klar war, aber wir wussten es nicht mehr so ganz genau, wir waren daher immer ein wenig unsicher“.

Wird das Netz der Gruppe *SIF* nach inhaltlichen Kriterien bewertet, so nimmt es in einer Ranking – Liste den zweiten Platz ein. Der Unterschied in der Netzgüte zum Concept-Map, das den ersten Platz erhält, ist gering.

### *Ergebnis*

Die Gruppe *SIF* nutzt die Kartenvorgabe als Strukturierungshilfe für die gestellte Aufgabe. Sie beginnt mit den Karten, deren Zusammenhänge sofort präsent sind. Dazu gehören sowohl Begriffe, die Vorgänge beschreiben, als auch Begriffe, die übergeordnet sind und komplexere Zusammenhänge umfassen. Sind Karten nicht sofort einzuordnen, wird in der Gruppe versucht, durch intensive Kommunikation einen Konsens zu finden.

### **Gruppe JEJC**

Nach Einschätzung von drei Schülerinnen werden die Strukturvorgaben des Verfahrens als Hilfe angesehen. Aus dem Beobachtungsbogen ist ersichtlich, dass die Schülerinnen mit den Karten beginnen, die Vorgänge beschreiben. Erst die sechste von dieser Gruppe gelegte Karte ist eine Karte mit erklärendem Inhalt. Darauf folgen weitere Karten mit Begriffen, die auf größere Zusammenhänge verweisen. Im Beobachtungsbogen ist vermerkt, dass zwischen Karten unterschieden werden, die ein Prinzip verdeutlichen und Karten, die Tatsachen beschreiben (vgl. Anhang C 181).

Eine Schülerin vermisst den Austausch in der Gruppe über die gelegten Begriffe. Sie beklagt, dass bei der vorgenommenen Verknüpfung des Begriffes ‚Le Chatelier Prinzip‘ notwendige Erklärungen in der Gruppe fehlten:

„Die Begriffe wurden ausgewählt, ohne zu erklären, um was es sich handelt. Sie wurden dann verknüpft. Warum diese Verknüpfungen ausgewählt wurden, war nicht klar. Eher nach dem Prinzip, ach ja, das passt, nehmen wir mal‘ (vgl. Anhang C 179 – C 180).

Auf weiteres Nachfragen der Beobachterin ergänzte sie:

„Le Chatelier Prinzip wurde einfach ausgewählt, ohne dass erklärt worden ist, was man darunter versteht. Die Karte wurde dann blind verknüpft, also ohne dass die eigentliche Aussage des Le Chatelier Prinzips klar war“.

Eine andere Schülerin ist gegensätzlicher Meinung. Für sie waren die Begriffe geklärt.

Das Beobachtungsprotokoll (vgl. Anhang C 181) zeigt, dass von dieser Gruppe eine Unterscheidung der Karten vorgenommen wird. Zuerst werden die Karten gewählt, die durch die Beschreibung der Vorgänge leicht in Wirkungszusammenhänge gebracht werden können. Im zweiten Schritt werden die Karten mit erklärenden Begriffen zugefügt. Die Vorgehensweise wird nicht oder nicht ausreichend kommentiert. Für eine Schülerin, die vermutlich die unterschiedliche Qualität der Begriffe nicht erkannt hat, fehlten Erklärungen. Für sie war der soziale Austausch und die inhaltliche Auseinandersetzung in der Gruppe nicht ausreichend. Daher bleibt bei ihr der Eindruck, dass die Reihenfolge der Karten und ihre Verknüpfungen eher zufällig waren.

Eine Schülerin bestätigt, dass sie keine Schwierigkeiten gehabt hat, die Begriffe sinnvoll miteinander zu verknüpfen. Sie führt das auf ihre gute Behaltensleistung zurück. Das bezieht sich insbesondere auf Inhalte, die in einer Klausur abgefragt worden sind.

„Ich hatte keine Schwierigkeiten. Normalerweise merke ich mir dann, was in der Arbeit dran war, die kann ich dann länger. Die meisten Sachen waren in der Arbeit oder nicht? Ich fand das nicht so schwer, mich daran zu erinnern“.

Das Netz der Gruppe *JEJC* ist das beste Netz in der Ranking – Liste. Es enthält 18 Aussagen, davon sind 17 fachlich korrekt. Die Übereinstimmung mit dem Referenznetz ist am höchsten. Die Erstellung des Netzes wird vorwiegend von zwei der vier Schülerinnen vorgenommen. Sie werden als engagiert, dominant und bestimmend beschrieben. Die beiden anderen Schülerinnen werden eher zurückhaltend und sporadisch nachfragend eingeschätzt.

### *Ergebnis*

Die Wissenskonstruktion wird in dieser Gruppe überwiegend von zwei Schülerinnen vorgenommen. Sie haben vermutlich ähnliche Hintergrundkonzepte, die durch den Aufgabenreiz aktualisiert werden. Sie nutzen die Strukturhilfen, erklären sie aber nicht umfassend genug, um die Vorgehensweise für alle Gruppenteilnehmer nachvollziehbar zu machen.

### **Zusammenfassung und Reflexion der Gruppenarbeiten**

Drei Gruppen beginnen mit Karten, die einen Vorgang beschreiben, eine Gruppe beginnt mit Karten, die einen hohen Erklärungswert haben. Die vorgegebene Auswahl der Karten kann die Erstellung eines Concept-Maps erleichtern oder erschweren. Es sind zum einen Karten, die Vorgänge darstellen. Dazu gehören:

- Löslichkeit von  $\text{CO}_2$ ,
- pH – Werterniedrigung,
- Erhöhung der Atemfrequenz,
- Konzentration von Hydrogencarbonat,
- Säureabgabe ins Blut.

Zum anderen sind es Karten, die einen Erklärungswert haben. Dazu gehören:

- MWG,
- Le Chatelier Prinzip,
- Gleichgewichtslage,
- Pufferkapazität,
- Konzentrationsverhältnis von Hydrogencarbonat und Kohlensäure.

Diejenigen Schüler, die erkennen, dass es Karten gibt, die eine andere Qualität haben und damit unterschieden werden können, zeigen eine höhere Transferleistung. Für schwächere Schüler, die den Unterschied nicht erkennen, sind Karten mit unterschiedlicher Qualität eine Erschwernis. Leistungsstarke Schüler mit einem differenzierten Hintergrundwissen können vermutlich Karten mit einem unterschiedlichen komplexen Inhalt einander korrekt zuordnen, ohne dabei den Qualitätsunterschied der Karten besonders hervorzuheben. Ebenso wie die Begriffe sind auch die

Verknüpfungen zu überprüfen. ‚Beeinflusst‘ wird von den Schülern als Allerweltsbegriff verstanden. Bemängelt wird auch, dass die Auswahl der Verknüpfungen nicht reichhaltig und präzise genug ist.

Die Gruppen arbeiten unterschiedlich kooperativ. In einer Dreiergruppe wird das Concept-Map weitgehend in einer Einzelleistung erstellt, in zwei Gruppen ist das Concept-Map vornehmlich auf eine Zweiergruppe innerhalb der Vierergruppe zurückzuführen. In der vierten Gruppe sind alle Gruppenteilnehmer engagiert beteiligt und Verständnisschwierigkeiten werden im Konsens gelöst.

Zu klären ist, in welchem Zusammenhang Gruppenarbeit, Akzeptanz des Concept-Mappings und Netzgüte stehen. Überprüft werden muss auch, welchen Einfluss die Gruppenzusammensetzung auf die Gruppenarbeit hat. Die Gruppen in dieser Untersuchung sind Teilgruppen eines Kurses und die Zusammensetzung erfolgte nach Freundschaften, ähnlichen Interessen oder rein zufällig. Zu prüfen bleibt daher, welche Auswirkungen eine theoriegeleitete Steuerung der Gruppenzusammensetzung auf die Akzeptanz des Concept Mappings und auf die Netzgüte hat.

#### **4.4.6 Auswertung des Fragebogens zum Concept-Mapping**

Direkt nach der Erstellung des Concept-Maps erfolgte in beiden Untersuchungsgruppen (Gruppe HOF und Gruppe KSN) eine schriftliche Befragung. Es liegen 27 Fragebögen vor. Die Fragebögen 1-12 gehören zur Gruppe KSN, die Fragebögen 13 – 27 zur Gruppe HOF (vgl. Anhang C 201). Die Auswertung erfolgt mit den üblichen statistischen Instrumentarien, zu denen Mittelwertsbestimmungen, Korrelationsanalysen und Faktorenanalysen gezählt werden.

#### **Häufigkeitsbestimmungen, Mittelwertsbestimmung und Deutung der Befunde**

Die Fragen des Fragebogens werden nach folgenden Kategorien sortiert:

- Akzeptanz der Methode
- Eignung der Methode zur Wissensaktivierung
- Akzeptanz der Gruppenarbeit
- Fehlentwicklungen in der Gruppenarbeit

**Tabelle 52: Akzeptanz der Methode (vgl. Anhang C 203 - 205)**

Nr	Frage	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$ <sup>77</sup>	$s$ <sup>78</sup>	Median
1	Concept-Maps eignen sich nicht für jeden Kontext.	28%	34%	38%	3,1	1,2	3
2	Das Phänomen der Hyperventilation lässt sich durch ein Concept-Map angemessen aufschlüsseln.	<b>80%</b>	17%	3%	2	0,8	2
3	Das Kohlendioxid/Hydrogencarbonatgleichgewicht ist weniger gut geeignet für ein Concept-Map.	7%	31%	62%	3,7	0,8	4
4	Beeindruckend ist an einem Concept-Map die Darstellung eines Phänomens im Gesamtzusammenhang.	58%	25%	17%	2	0,9	2
5	Im Concept-Map liegt nur ein reduziertes Beziehungsgefüge vor.	14%	64%	22%	2,5	1	2
6	Eine Verengung auf ein Einzelproblem wird im Concept-Map vermieden.	36%	47%	17%	2,8	0,9	3

*Teilergebnis*

Den Kontextaspekt ‚Hyperventilation‘ halten die Mehrzahl der Probanden für die Erstellung eines Concept-Maps geeignet. Item 2 wird von 80% der Befragten zustimmend beantwortet, Item 3 eher ablehnend. Die Aussagekraft zu den übrigen Items ist weniger eindeutig.

**Tabelle 53: Eignung der Methode zur Wissensaktivierung (vgl. Anhang C 203 – C 205)**

Nr.	Frage	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	$s$	Median
7	Vorhandenes Wissen kann mit Hilfe von Concept-Maps aktiviert werden.	<b>88%</b>	20%	0%	1,8	0,6	2
8	Concept-Maps sind eine Überforderung, wenn dazu nötiges Wissen nicht präsent ist.	40%	42%	18%	2,7	1	3
9	Concept-Maps erleichtern mir das Lernen eines komplexen Zusammenhangs.	51%	17%	32%	2,6	1	2
10	Concept-Maps sind nach einem halben Jahr für mich missverständlich.	10%	21%	<b>69%</b>	3,7	0,97	4
11	Ich habe Begriffe miteinander verknüpft, ohne dass mir das Hintergrundwissen präsent war.	3%	61%	36%	1,7	2	<b>0</b>
12	Durch die vorgegebenen Begriffe und Verknüpfungen fiel es mir leicht, mein Wissen zum Phänomen Hyperventilation zu präsentieren.	14%	68%	18%	1,4	1,6	<b>0</b>

*Teilergebnis*

Die Schüler und Schülerinnen sind der Meinung, dass mit Hilfe von Concept-Maps ihr Wissen aktiviert und verständlich dargestellt wird. Item 7 wird eindeutig zustimmend beantwortet, Item 10

<sup>77</sup> arithmetisches Mittel (gerundet)

<sup>78</sup> Standardabweichung (gerundet)

deutlich abgelehnt. Die Mittelwertsbestimmungen zu Item 11 und zu Item 12 werden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da nur 55% der Befragten die Items beantwortet haben.

Im Fragebogen gab es die Möglichkeit, sich offen über die Methode des Concept-Mappings zu äußern. 20 Schüler nahmen die Möglichkeit nicht wahr. Neun Schüler und Schülerinnen formulierten Ihre Meinung schriftlich. Von den neun Antworten zeigen vier eine hohe Akzeptanz des Concept – Mappings (vgl. C 203).

- „Concept-Maps sind als Wissensüberprüfung gut geeignet“.
- „Concept-Maps sind ein gutes Mittel, gelerntes Wissen aufzufrischen. Man kann Zusammenhänge gut erkennen. Ein ausführlicher Text ist allerdings zusätzlich nötig“.
- „Ich glaube zum Vertiefen und Erinnern sind Concept-Maps sehr sinnvoll, jedoch benötigt man ein Grundwissen, um diese auszuführen zu können“.
- „Es hat sehr viel Spaß gemacht, mit den anderen über ein altbekanntes Thema zu diskutieren und eine Lösung zu erstellen. Sollte öfters gemacht werden.“

Drei Äußerungen weisen auf die Schwierigkeiten hin, die mit der Erstellung von Concept-Maps einher gehen und mit der Rekonstruktion des Wissens verknüpft sind:

- „Concept-Maps sind meiner Meinung nach nicht zum Lernen von Sachverhalten, sondern eher zum effektiven Wiederholen geeignet. Da keine externen Informationen vorlagen, war ein eigenständiges Erarbeiten und Lernen nicht möglich“.
- „Man hat dann evt. Dinge veranschaulicht und sich falsch einprägt, die unter Umständen nur aufgrund von kleinen Verwechslungen falsch sind“.
- „Es ist teilweise sehr schwer, die speziellen Begriffe einzuordnen, da ich mich oft nur noch grundsätzlich an den Vorgang erinnern konnte.“

**Tabelle 54: Akzeptanz der Gruppenarbeit (vgl. Anhang C 203 – 205)**

Nr.	Frage	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
14	Mir gefällt Gruppenarbeit nicht.	14%	1%	<b>85%</b>	4,3	0,8	4
15	Gruppenarbeit fördert die Kooperations- und Teamfähigkeit.	<b>84%</b>	16%	0%	1,8	0,7	2
16	Für mich war Gruppenarbeit nicht effektiv.	7%	13%	<b>80%</b>	4	0,8	4
17	Ich habe während der Gruppenarbeit fachlich viel gelernt.	15%	57%	28%	3	1	3
18	Wir konnten in der Gruppe gut zusammenarbeiten.	21%	77%	<b>2%</b>	2,0	0,9	2

### *Teilergebnis*

Die Akzeptanz der Gruppenarbeit beim Erstellen des Concept-Maps ist hoch. Die Items 14, 16 und 18 werden deutlich ablehnend beantwortet. Die Beantwortung der Items 15 und 18 ist eher zustimmend.

**Tabelle 55: Fehlentwicklungen in der Gruppenarbeit (vgl. Anhang C 203 – 205)**

Nr.	Frage	stimmt völlig/eher	stimmt teils/teils	stimmt eher nicht/gar nicht	$\bar{x}$	s	Median
19	Aus meiner Sicht waren die Arbeiten in unserer Gruppe ungleich verteilt.	18%	16%	66%	3,7	1	4
20	Uns hat während der Gruppenarbeit Zeit gefehlt.	14%	32%	54%	3,4	0,95	4
21	Die für die Gruppenarbeit zur Verfügung stehende Zeit muss von uns besser eingeteilt werden.	18%	31%	51%	3,5	0,96	4
22	Ich fühlte mich beim Erstellen des Concept-Maps allein gelassen und hätte mir eine stärkere Präsenz der Lehrerin gewünscht.	3%	2%	<b>95%</b>	4,4	0,8	5
24	Im Unterrichtsgespräch wären wir zu den gleichen Lernergebnissen gekommen, aber in einer viel kürzeren Zeit.	29%	42%	29%	2,6	1,3	3
27	Die Arbeit in der Gruppe war nicht geeignet, Verständnisprobleme zu lösen.	10%	6%	<b>84%</b>	3,9	1	4
28	In der Gruppenarbeit fühle ich mich in der Entwicklung meiner eigenen Ideen behindert.	3%	16%	<b>81%</b>	4	0,79	4

### *Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Mittelwertanalyse*

Der vorgegebene Zeitrahmen für die Erstellung des Concept-Maps wird unterschiedlich bewertet. Für 54% der Befragten war der Zeitrahmen angemessen, für 14% fehlte Zeit. Die Zeiteffizienz der Gruppenarbeit im Vergleich zum Unterrichtsgespräch wird ebenso unterschiedlich eingeschätzt. Eine eindeutige Tendenz ist nicht ablesbar.

Die Gruppenarbeit während der Erstellung des Concept-Maps wird als geeignete Methode angesehen. Fehlentwicklungen, die dazu führen, dass Ideen nicht zum Tragen kommen und Verständnisprobleme ungelöst bleiben, werden eher verneint. Item 19, Item 22, Item 27 und Item 28 werden zum Teil deutlich ablehnend beantwortet.

Im Fragebogen gab es die Möglichkeit, sich offen über die Gruppenarbeit zu äußern. Wahrgenommen wurde dies von fünf Schülern. Zwei Äußerungen verweisen darauf, dass es effizienter sein könnte, wenn die Gruppenzusammensetzung nicht immer dieselbe ist sondern variiert. Eine Äußerung verweist auf die fehlende Sicherheit, die mit dem eigenständigen Erarbeiten verknüpft ist. Im fragend – entwickelnden Unterrichtsgespräch scheint nach Einschätzung dieser Schülerin das Sicherheitsbedürfnis eher berücksichtigt zu sein (vgl. Anhang C 205).

- „Es bestand eine gute Teamfähigkeit.“
- „Die Gruppen sollten noch mehr variiert werden. Ich finde es gut, immer mit neuen Leuten zusammenzuarbeiten.“
- „Jede Gruppe muss variiert werden. Besser als durch Concept-Maps kann man sich Zusammenhänge durch Erfahrungen (Tauchen) einprägen und verstehen.“
- „Der Anfang fällt ziemlich schwer“.
- „Ich denke, dass diese Art von Arbeit die schüchternen Schüler benachteiligt. Am besten fände ich es, man würde Concept-Maps im Unterrichtsgespräch erarbeiten, damit man ständig die Kontrolle der Lehrkraft hat und sich

nicht so verloren fühlt und sich auch nichts Falsches merkt. Außerdem sollte man die Unterlagen mitbenutzen können, wenn ein Thema schon ein wenig zurückliegt“.

## Korrelationsanalyse und Deutung der Befunde (vgl. Anhang C 206)

Tabelle 56: Ausgewählte Korrelationen (vgl. Anhang C 206)

Nr.	Itempaare	r
11/12	Ich habe Begriffe miteinander verknüpft, ohne dass mir das Hintergrundwissen präsent war. Durch die vorgegebenen Begriffe und Verknüpfungen fiel es mir leicht, mein Wissen zum Phänomen ‚Hyperventilation‘ zu präsentieren.	0,85
14/28	Mir gefällt Gruppenarbeit nicht. In der Gruppenarbeit fühlte ich mich in der Entwicklung meiner eigenen Ideen behindert.	0,59
12/18	Durch die vorgegebenen Begriffe und Verknüpfungen fiel es mir leicht, mein Wissen zum Phänomen ‚Hyperventilation‘ zu präsentieren. Wir konnten gut in der Gruppe zusammenarbeiten.	0,58
10/14	‚Concept-Maps‘ sind nach einem halben Jahr für mich missverständlich. Mir gefällt Gruppenarbeit nicht.	0,57
7/17	Vorhandenes Wissen kann mit Hilfe von Concept-Maps aktiviert werden. Ich habe während der Gruppenarbeit fachlich viel gelernt.	0,56
17/23	Ich habe während der Gruppenarbeit fachlich viel gelernt. Mir hat die Gruppenarbeit genügend Freiraum gegeben, mein Wissen zu erweitern und vertiefen.	0,53
2/23	Das Phänomen ‚Hyperventilation‘ lässt sich durch ein Concept-Map angemessen aufschlüsseln. Mir hat die Gruppenarbeit genügend Freiraum gegeben, mein Wissen zu erweitern und vertiefen.	0,51
18/19	Wir konnten in der Gruppe gut zusammenarbeiten. Aus meiner Sicht waren die Arbeiten in unserer Gruppe ungleich verteilt.	-0,68
12/16	Durch die vorgegebenen Begriffe und Verknüpfungen fiel es mir leicht, mein Wissen zum Phänomen ‚Hyperventilation‘ zu präsentieren. Für mich war Gruppenarbeit nicht effektiv.	-0,60
4/16	Beeindruckend ist an einem Concept-Map die Darstellung eines Phänomens im Gesamtzusammenhang. Für mich war Gruppenarbeit nicht effektiv.	-0,54
11/16	Ich habe Begriffe miteinander verknüpft, ohne dass mir das Hintergrundwissen präsent war. Für mich war Gruppenarbeit nicht effektiv.	-0,52

### Auswertung der Korrelationsanalyse

Zur Auswertung der Befragung über das Concept-Mapping liegen 27 Datensätze vor. Es werden elf Korrelationen ausgewählt, deren Korrelationskoeffizient größer als 0,5 und kleiner als – 0,5 ist. Die Korrelationen der Itempaare 12/18, 10/14, 7/17, 17/23, 2/23, 14/28 sind durch den nahe liegenden Zusammenhang zwischen Akzeptanz der Gruppenarbeit und Einschätzung ihres Ergebnisses interpretierbar.

Die negativen Korrelationen für die Itempaare 12/16, 4/16 und 11/16 legen nahe, dass entweder die Effizienz der Gruppenarbeit die Präsentation des Wissens im Concept-Map beeinflusst oder die Akzeptanz der Gruppenarbeit sich auf das Ergebnis des Concept-Mappings auswirkt. Das mathematische Beschreibungsmodell, das der Korrelationsanalyse zugrunde liegt, lässt eine

Unterscheidung zwischen abhängigen und unabhängigen Merkmalen unter gegebenen Bedingungen nicht zu.

Aus der Perspektive des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatzes lassen sich die gefundenen Zusammenhänge deuten. Krapp (1996 S. 48, 1999 S. 397) geht in seinem Rahmenmodell davon aus, dass das Ergebnis des Lernprozesses auf die Lernmotivation und damit auch auf Persönlichkeitsvariablen des Lernalters zurückwirkt. Auf die Erstellung des Concept-Maps bezogen heißt das, dass die Anreize, die mit der Fertigstellung des Concept-Maps verbunden sind, auf die Einschätzung der Gruppenarbeit zurückwirken. Ebenso kompatibel mit den Modellannahmen sind in diesem Fall die Aussagen, wenn abhängige und unabhängige Variablen vertauscht werden. Das heißt, ist die Gruppenarbeit mit einer positiven Erlebnisqualität verknüpft und fördert sie damit das kooperative Lernen, dann zeigt sich das auch im Lernerfolg.

Der scheinbar widersprüchliche Zusammenhang zwischen Item 11 und Item 12 lässt sich aus theoretischen Annahmen der multimodalen Gedächtnistheorie deuten (Engelkamp 1991 S.366 ff). Die gefundene Korrelation steht im Einklang mit der Hypothese, dass die Methode, die zur Wissensdiagnose gewählt wird, das Ausmaß des erinnerten und präsentierten Wissens beeinflusst (vgl. Engelkamp 1991 S. 94).

„Itemspezifische und relationale Informationen werden beim Lernen (...) enkodiert, und sie können in der Testphase zum Erinnern genutzt werden. Wie effizient die eine bzw. andere Information für den Test ist, hängt vom Test ab oder unterliegt – allgemeiner gesprochen – dem Prinzip der Encodierspezifität. (...) Der Erfolg beim Abruf ist umso höher, je mehr der spezifische Abrufprozess auf die Informationen zurückgreifen kann, die auch enkodiert wurden“ (Engelkamp 1994 S.1999 zitiert in Eckert 1998 S. 47).

## Faktorenanalyse

### Faktor 1: Akzeptanz des Concept-Mapping als Methode

**Tabelle 57: Akzeptanz des Concept-Mappings als Methode (vgl. Anhang C 207)**

Faktorladung	Nr.	Frage	$\bar{x}$	s	Median
0,719	12	Durch die vorgegebenen Begriffe und Verknüpfungen fiel es mir leicht, mein Wissen zum Phänomen ‚Hyperventilation‘ zu präsentieren.	1,4	1,6	0
0,664	2	Das Phänomen Hyperventilation lässt sich durch ein ‚Concept-Map‘ angemessen aufschlüsseln.	1,9	0,77	2
0,614	4	Beeindruckend in einem ‚Concept-Map‘ ist die Darstellung eines Phänomens in einem Zusammenhang.	3,7	0,8	4
- 0,639	28	In der Gruppenarbeit fühlte ich mich in der Entwicklung meiner Ideen behindert.	4	0,79	4
0,614	15	Gruppenarbeit fördert die Kooperations- und Teamfähigkeit.	1,82	0,67	2
0,588	17	Ich habe durch die Gruppenarbeit viel gelernt.	3,2	1,14	3

### Auswertung zum Faktor 1

Das Itembündel, das dem latenten Faktor 1 zugeordnet wird, enthält vorrangig sechs Items. Das Item, das mit dem Faktor am höchsten korreliert, ist Item 12. Item 12, Item 2 und Item 4 beziehen sich auf die Einschätzung der Wissensdiagnose mit Hilfe von Concept-Maps. Sie werden im arithmetischen Mittel eher zustimmend beantwortet und korrelieren positiv mit dem latenten Merkmal, das dem Faktor 1 zugeordnet wird..

Item 28, Item 15 und Item 17 erfragen die Einschätzung der Gruppenarbeit, die mit der Wissensdiagnose verknüpft ist. Item 28 wird eher ablehnend beantwortet und zeigt eine hohe negative Korrelation mit dem latenten Faktor. Es könnte sich beim Faktor 1 um einen Zweikomponentenfaktor handeln, der die Akzeptanz der Wissenspräsentation im Conceptmap und die Akzeptanz der mit der Wissenspräsentation verknüpften Gruppenarbeit in einen Zusammenhang stellt.

Die Akzeptanz der Methode des Concept-Mappings steht im positiven Zusammenhang mit

- der Akzeptanz der Gruppenarbeit (Item 15),
- der Art des Hintergrundwissens, das präsentiert werden soll (Item 2),
- einer positiven Erlebnisqualität (Item 4),
- einem Kompetenzzempfinden (Item 12).

### Faktor 2: Abhängigkeit des Zeitmanagements vom Vorwissen

**Tabelle 58: Zeitmanagement (vgl. Anhang C 207- 208)**

Faktorladung	Nr.	Frage	$\bar{x}$	s	Median
0,809	20	Uns hat während der Gruppenarbeit Zeit gefehlt	3,4	0,95	4
0,701	1	Concept-Maps eignen sich <b>nicht</b> für jeden Kontext.	3,1	1,2	4
0,590	19	Aus meiner Sicht waren die Arbeiten in unserer Gruppe ungleich verteilt.	3,7	1,0	4
0,534	22	Ich fühlte mich beim Erstellen des Concept-Maps allein gelassen und hätte mir eine stärkere Präsenz meiner Lehrerein gewünscht.	4,4	0,8	5
0,523	7	Vorhandenes Wissen kann mit Hilfe von Concept-Maps aktiviert werden.	1,8	0,6	2

### Auswertung zum Faktor 2

Item 20, Item 1, Item 7 korrelieren positiv mit dem latenten Merkmal. Der Faktor 2 könnte das Vorwissen und das Zeitmanagement als Variablen enthalten. Damit wäre Faktor 2 auch ein Zweikomponentenfaktor. Plausibel sind folgende Hypothesen: Wenn das Wissen präsent ist, das dokumentiert werden soll, eignet sich nahezu jeder Kontext, der zur Vernetzung des Wissens gewählt wird. Ist der Zugriff auf das Vorwissen gegeben, treten keine Zeitprobleme bei der Erstellung des Concept-Maps auf.

Die hohe Ablehnung des Items 22 zeigt, dass die Beteiligten selbständig das Concept-Map erstellen konnten und eine stärkere Präsenz des Lehrers nicht nötig war. Das spricht dafür, dass der Faktor 2 als latentes Merkmal das Vorwissen als unabhängige Variable enthält. Zeitmanagement und der Grad der Selbständigkeit hängen vom Vorwissen ab. Im Einklang damit steht auch die Bewertung von Item 1. Die Bewertung liegt im mittleren Bereich ohne deutliche Zustimmung oder Ablehnung. Ist das zu präsentierende Vorwissen groß, eignet sich nahezu jeder Kontext. Fehlt das Vorwissen, scheint auch Concept-Mapping keine geeignete Methode zur Wissensdiagnose zu sein.

Die Abhängigkeit des Zeitmanagements vom Vorwissen steht im positiven Zusammenhang mit

- einer kooperativen Zusammenarbeit in der Gruppe (Item 19)
- einem Kompetenzzempfinden (Item 22).

#### *Zusammenfassung der Teilergebnisse aus der Fragebogenanalyse*

Das Concept-Mapping wird mehrheitlich positiv bewertet: Den Kontextaspekt ‚Hyperventilation‘ halten 80% der Probanden für die Erstellung eines Concept-Maps geeignet. 88% der Befragten sind der Meinung, dass mit Hilfe von Concept-Maps ihr Wissen aktiviert und verständlich dargestellt werden kann. Bestätigt wird dies in folgenden Äußerungen (vgl. Anhang C 203):

- „Concept-Maps ist als Wissensüberprüfung gut geeignet“.
- „Concept-Maps sind ein gutes Mittel, gelerntes Wissen aufzufrischen. Man kann Zusammenhänge gut erkennen. Ein ausführlicher Text ist allerdings zusätzlich nötig“.
- „Ich glaube, zum Vertiefen und Erinnern sind Concept-Maps sehr sinnvoll, jedoch benötigt man ein Grundwissen, um diese ausführen zu können“.
- „Es hat sehr viel Spaß gemacht, mit den anderen über ein altbekanntes Thema zu diskutieren und eine Lösung zu erstellen. Sollte öfters gemacht werden“.

Die Akzeptanz der Gruppenarbeit beim Erstellen des Concept-Maps ist hoch. Die Zustimmung liegt bei 80%. Fehlentwicklungen, die dazu führen, dass Ideen nicht zum Tragen kommen und Verständnisprobleme ungelöst bleiben, werden eher verneint. In offenen Äußerungen wird die gute Teamarbeit hervorgehoben. Zwei Äußerungen verweisen auf die fehlende Sicherheit, die mit dem eigenständigen Erarbeiten verknüpft ist (vgl. Anhang C 203).

- „Man hat dann evt. Dinge veranschaulicht und sich falsch einprägt, die unter Umständen nur aufgrund von kleinen Verwechslungen falsch sind“.
- „Ich denke, dass diese Art von Arbeit die schüchternen Schüler benachteiligt. Am besten fände ich es, man würde Concept-Maps im Unterrichtsgespräch erarbeiten., damit man ständig die Kontrolle der Lehrkraft hat und sich nicht so verloren fühlt und sich auch nichts Falsches merkt. Außerdem sollte man die Unterlagen mitbenutzen können, wenn ein Thema schon ein wenig zurückliegt“.

Die Korrelationen von zehn Itempaare weisen auf einen Zusammenhang hin, der einher geht mit Annahmen aus der Forschungsperspektive des *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen Forschungsmodells*. Danach korreliert die Bewertung einer Methode positiv mit der Einschätzung ihres Resultates (vgl. Krapp 1996 S. 48). Die Faktorenanalyse erlaubt es ebenso wie die

Korrelationsanalyse, Aussagen über enge Zusammenhänge zwischen Merkmalen<sup>79</sup> zu machen. Dazu liefert die Faktorenanalyse folgende, plausible Hypothesen:

Die Akzeptanz der Methode steht im positiven Zusammenhang mit

- der Akzeptanz der Gruppenarbeit (Item 15),
- der Art des Hintergrundwissens, das präsentiert werden soll (Item 2),
- einer positiven Erlebnisqualität (Item 4),
- einem Kompetenzzempfinden (Item 12).

Die Abhängigkeit des Zeitmanagements vom Vorwissen steht im positiven Zusammenhang mit

- einer kooperativen Zusammenarbeit in der Gruppe (Item 19),
- einem Kompetenzzempfinden (Item 22).

Aus der Perspektive des *entwicklungs – und persönlichkeits-theoretischen Forschungsansatzes* (vgl. Krapp 1996 S. 48) sind die gefundenen Zusammenhänge plausibel. Das Concept-Mapping ist als Methode eine spezielle Form der Gruppenarbeit. Die Gruppenarbeit liefert eine Reihe von Anreizen, die vom aktuellen sozialen Umfeld bestimmt werden und die die Lernmotivierung beeinflussen. Liegt eine intrinsische Motivierung bei den Probanden vor, so geht das einher mit einer positiven Erlebnisqualität und einem ausgeprägten Kompetenzzempfinden der Probanden. Die intrinsische Motivierung wird entscheidend vom Lerngegenstand und seinem Schwierigkeitsgrad mitbestimmt. Erfordert die Aufgabe ein Hintergrundwissen, das zur Verfügung steht, und ist die Gruppenarbeit störungsfrei, so wird die intrinsische Motivierung erhöht und die Akzeptanz des Concept-Mappings als Wissensdiagnose nimmt zu.

Steht das Hintergrundwissen dagegen nicht zur Verfügung, dann ist das Autonomieempfinden der Gruppenmitglieder gering. Die Gruppe hat Zeitprobleme und kann die Aufgabe in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht beenden. Diese negativen Bedingungen sind meistens mit einem geringen Erfolg verknüpft. Daraus ergibt sich psychologisch eine negativ bedingte Grundeinstellung zur Methode der Concept-Maps. Concept-Mapping wird als diagnostisches Werkzeug zur Wissensüberprüfung eher abgelehnt, wenn das Vorwissen gering ist und die Gruppe in Zeitnöte gerät.

#### **4.5 Leistungstest als Wissensdiagnose**

Ein zusätzlicher Leistungstest wurde etwa vier Monate nach den erstellten Concept-Maps in der Gruppe KSN durchgeführt. Direkt im Anschluss an die Überprüfung erfolgte eine Befragung zum Leistungstest. Am Test haben 13 Schüler und Schülerinnen teilgenommen (vgl. Anhang C 210). In

---

<sup>79</sup> Da es sich ebenfalls um ein mathematisches Beschreibungsmodell handelt, können keine Kausalbeziehungen zwischen den Merkmalen abgeleitet werden (Bortz 1996 S. 483-485).

der Zeit zwischen dem Concept-Mapping und dem Leistungstest wurde im herkömmlichen Unterricht nach der Vorgabe der niedersächsischen Rahmenrichtlinien das sich anschließende Thema ‚Elektrochemie‘ unterrichtet. Zeitgleich vorliegende, homogene und sich wechselseitig beeinflussende Gleichgewichte waren zuletzt im Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ thematisiert worden und wurden im Rahmen des Unterrichts als Erklärung für körperliche Phänomene zuletzt im Concept-Map zum Thema ‚Hyperventilation‘ aus der Erinnerung rekonstruiert. In den beiden Stunden vor dem Leistungstest wurde die Nomenklatur von kationischen Komplexen am Beispiel von Eisen – III – Ionen eingeführt.

Für die Schüler und Schülerinnen war die Aufgabe im Leistungstest neu und mit einem hohen problemlösenden Anteil versehen (vgl. Anhang C 210 – C 212). Es handelt sich nicht um Zwei – Phasen – Gleichgewichte, wie sie im Rahmen des Kurses ‚Elektrochemie‘ erarbeitet wurden; vielmehr handelte es sich vorwiegend um Komplexgleichgewichte in einer homogenen Lösung. Eines der Gleichgewichte, das Hydrogencarbonat – Carbonat – Gleichgewicht war aus dem Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ bekannt. Die übrigen Gleichgewichte waren Komplexgleichgewichte und neu. Der Farbwechsel, der stattfand, wenn eine Lösung von einem Becherglas in das andere gegeben wurde, war das kontextunabhängige Phänomen, das im Leistungstest erklärt werden sollte.

### *Ergebnis*

Die Bewertung erfolgte nach der im Erwartungshorizont vorgegebenen Punktzahl. Im arithmetischen Mittel werden von den Schülern 15,7 Punkte von 25 Punkten erreicht, das sind 62,8% der erwarteten Leistung. Die Leistungen von vier Schülern sind nicht mehr ausreichend, vier Schülerinnen hingegen zeigen überwiegend sehr gute Leistungen. Von vier Schülern liegen befriedigende Leistungen vor, ein Schüler zeigt ausreichende Leistungen (vgl. Anhang C 212).

In einer Veröffentlichung von Sumfleth (1988) liegen Ergebnisse von zwei abschließenden Tests in der Jahrgangsstufe 11 vor. Die Untersuchung wurde 1986 mit 257 bzw. 183 Gymnasialschülern durchgeführt. Bei den abschließenden Tests handelt es sich um eine Kombination aus Erklärungstest, Schulleistungstest und Verknüpfungstest. Im Erklärungstest wird eine Definition von fünf Fachbegriffen verlangt. Beim Verknüpfungstest werden ähnlich wie beim Erstellen von Concept-Maps Begriffe vorgegeben, die sinnvoll in Sätzen miteinander verknüpft werden sollen. Der Schulleistungstest entspricht einer Klausur in Klasse 11 und ist mit dem Abschlusstest der vorliegenden Untersuchung vergleichbar. Ein Vergleich der Ergebnisse der Schulleistungstests mit dem Abschlusstest dieser Arbeit zeigt, dass die Schüler im von Sumfleth untersuchten Jahrgang 11 nach einem halben Jahr nur im Mittel 30 % der erwarteten Leistungen im Transfer und problemlösenden Bereich erbringen. Damit liegen die Leistungen der Stichprobe im Durchschnitt nicht mehr im ausreichendem Bereich.

Das arithmetische Mittel der Leistungen von Schüler, die an dieser vorliegenden Untersuchung beteiligt sind, liegt im befriedigenden Bereich. Die Leistung von vier Schülern ist nicht mehr ausreichend. Dagegen zeigen vier Schülerinnen hervorragende Leistungen. Der Ausfall des Leistungstests lässt den Rückschluss zu, dass von der überwiegenden Anzahl der Schüler die wechselseitige Beeinflussung zeitgleich vorliegender Gleichgewichte als Erklärung für neue Phänomene sinnvoll genutzt wird und in angemessener Fachsprache von ihnen formuliert werden kann.

Mit der sich an den Test anschließenden Gruppendiskussion waren zwei Anliegen verknüpft: Einerseits hatten die Schüler und Schülerinnen die Möglichkeit, inhaltliche Schwierigkeiten, die sich beim Lösen der Aufgabe ergaben, zu formulieren. Andererseits ergab sich die Möglichkeit für die Untersuchende nachzufragen, welche Erinnerungsstützen aus dem Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ für die Lösung der neuen Aufgabe hilfreich waren.

Auf die Frage nach Erinnerungsstützen, die bei der Bearbeitung der Aufgaben hilfreich waren, wurden folgende Antworten gegeben (vgl. Anhang C 214):

- „Das einzige war das MWG in der Beziehung“.
- „Was in Erinnerung geblieben ist, ist die Lösung im Mineralwasser.  $\text{CO}_2$  reagiert zu  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , zu  $\text{HCO}_3^-$  und letztlich zu  $\text{CO}_3^{2-}$ “.
- „Ich habe mich nicht wirklich erinnert. Ich habe mich nur an das erinnert, was ich brauche und das habe ich nicht mit Hyperventilation in Erinnerung gebracht“.

Die Aussagen der Schülerinnen in dem direkt auf den Test folgenden Gruppeninterview legen nahe, dass allgemeingültige systemische Zusammenhänge, zu denen wechselseitig sich beeinflussende Gleichgewichte gehören, ihnen als Wissensfundament zur Verfügung stehen, unabhängig von dem Kontext, in dem das Wissen erarbeitet worden ist.

## 5. Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

### Die Lernzyklen der Untersuchung

Das Ziel dieser Arbeit war, einen genaueren Einblick zu gewinnen über die Variablen des Lehr – Lerngeschehens, auf die sich eine neuartige Unterrichtsorganisation auswirkt, welche die Anforderungen der *Konzeption Chemie im Kontext* erfüllt. Die Konzeption *Chemie im Kontext* fußt auf einer Lerntheorie, die einer konstruktivistischen Position folgt. Die sozialkonstruktivistische Perspektive des *situierten Lernens* (vgl. Mandl et al. 1997 S. 169 – 178) betont die Bedingungen der Situationen, in denen das Lernen stattfindet. Zu den *situativen* Komponenten, die genauer ins Auge gefasst werden, gehören zum einen die Prozesse der Wissensvermittlung und zum anderen die Interaktionen der Lernenden untereinander.

Zu dieser Untersuchung wurden zwei Unterrichtseinheiten nach der Konzeption *Chemie im Kontext* entwickelt. In beiden Lernzyklen wird von einem komplexen Phänomen ausgegangen, das neu, ungewöhnlich und für den Lebenszusammenhang der Schüler bedeutsam ist. Die methodische Umsetzung erfolgt in Lernstationen, die selbständiges Lernen im kommunikativen Austausch ermöglichen. Beide Lernzyklen fußen auf drei gleichwertigen Prinzipien. Dazu gehören die Kontextorientierung, die besondere Gestaltung der Lernumgebung und die Basiskonzepte. Die Basiskonzepte werden durch vielfältige Zugriffe auf verschiedene Kontexte schrittweise aufgebaut. Die im Zentrum stehenden authentischen Fragestellungen sprechen Bausteine einer fachwissenschaftlichen Struktur an, die entweder schon in vorangegangenen Kontexten angelegt worden ist und neu verankert wird. Oder, die inhaltlichen Bausteine werden neu eingeführt, bauen aber auf vorhandenem Wissen auf.

Die Fachinhalte beider Lernzyklen greifen vielfältig auf unterschiedliche Basiskonzepte zurück. Das Basiskonzept, auf das der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ vornehmlich zurückgreift, ist das Gleichgewichtskonzept. Löslichkeitsgleichgewichte der Atemgase sowie die Protolysen der Kohlensäure werden in ihrer wechselseitigen Abhängigkeit und in ihrer Abhängigkeit vom Druck untersucht. Der fachwissenschaftliche Inhalt verweist einerseits auf Strukturen, die schon in vorangegangenen Lernzyklen des Curriculums *Chemie im Kontext* angelegt worden sind. Andererseits werden neue Fachinhalte angesprochen, die schwerpunktmäßig in nachfolgenden Kontexten verankert werden, zu denen auch der Kontext ‚Mangel und Überfluss‘ zählt.

Die katalytische Wirkungsweise der Carboanhydrase ist aus der Fachperspektive das Verbindende zwischen dem Kontext ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ und dem Kontext ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘. Die beschleunigte Einstellung des Kohlensäuregleichgewichtes verweist auf die Kinetik der Enzymreaktionen, die vornehmlich im Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss‘ schrittweise aufgebaut und quantitativ beschrieben wird. Nicht nur das Reaktionskinetik

- Konzept wird in beiden Zyklen angesprochen und schrittweise aufgebaut. Beide Zyklen enthalten auch unterschiedliche Aspekte zum Donator – Akzeptor – Konzept. Einerseits handelt es sich um Säure – Base – Reaktionen, die im Gleichgewicht enden, andererseits um Säure – Base – Reaktionen, die vollständig ablaufen.

Der zweite Lernzyklus ‚Mangel und Überfluss – fehlgesteuerte Ernährung‘ spricht Inhalte von drei Konzepten an. Es handelt sich dabei um das *Struktur- Eigenschaft – Konzept*, um das *Energie – und Entropie – Konzept* sowie um das *Reaktionsgeschwindigkeit - Konzept*. Sechs Kontextaspekte, die den Mangel und den Überfluss in der Ernährung unterschiedlich ausdrücken, sind mit fachlichen Bausteinen der entsprechenden Basiskonzepte verknüpft und inhaltlich auf unterschiedliche Kontextaspekte bezogen. Die horizontalen und vertikalen Verknüpfungen in unterschiedlichen Kontextaspekten und Kontexten entsprechen den Anforderungen der Konzeption *Chemie im Kontext*. Die Konzeption verfolgt damit das Ziel, dass von den Lernern ein kontextunabhängiges Fundament an Wissen aufgebaut wird. Das soll eingelöst werden durch ein grundlegendes Konzeptverständnis, das sich durch ein verfügbares und vernetztes Wissen auszeichnet.

### **Untersuchungsanlage und Ergebnisse**

Der Forschungsansatz in dieser Untersuchung ist eine Fallstudie, in der drei Untersuchungsgruppen zusammengefasst werden (vgl. Lamnek 1995 S. 7). Zu den Aspekten, die untersucht werden, gehören drei Bereiche. Überprüft werden die Akzeptanz eines kontextorientierten und multiperspektivisch ausgerichteten Lernzyklus, die Auswirkungen auf die Lernmotivierung der Schüler und der Einfluss auf ihre Behaltensleistung.

Ausgegangen wird dabei von folgenden Hypothesen:

Die kontextorientierte und multiperspektivisch ausgerichtete Unterrichtsorganisation des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘

- enthält bedeutsam eingeschätzte Lerninhalte,
- weckt Interesse,
- ist verknüpft mit einem hohen Maß an Eigentätigkeit und Eigenverantwortung,
- wirkt sich auf das Kompetenz- und Autonomieempfinden aus,
- beeinflusst die positive Erlebnisqualität und die Lernmotivierung in der Lernsituation,
- fördert die Behaltensleistung,
- führt zu einem strukturierten und anschlussfähigem Wissen,
- verändert die Lehrerrolle zum Moderator und Lernberater,
- erhöht die Medienkompetenz.

Das Forschungsdesign der Fallstudie greift auf qualitative Erhebungstechniken für die Datensammlung zurück. Dazu gehören angewandte Verfahren wie das Concept-Mapping, die

Gruppendiskussion und die teilnehmende Beobachtung. Dazu zählen auch offene Antwortformate in der Befragung, die den Bearbeiter auffordern, Antworten selbständig aufzuschreiben, ohne dass eine Auswahl zwischen vorgegebenen Alternativen möglich ist.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden nicht nur qualitative sondern auch quantitative Methoden eingesetzt. So wird die Befragung zur Akzeptanz quantitativ ausgewertet. Die Ergebnisse werden sortiert aufgelistet. Der Sortierungsschlüssel enthält acht Komponenten. Dazu zählen u.a. das Kompetenz- und Autonomieempfinden im Lernprozess, das aktualisierte Interesse am Lernstoff und die Einschätzung der Arbeit in den Lernstationen. Aufgelistet sind die Häufigkeiten der möglichen Antworten und die entsprechenden Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen. Das vorhandene Datenmaterial wird nicht nur für die genannten Kenndaten, die zur deskriptiven Statistik gerechnet werden, genutzt, sondern es dient auch für statistische Hypothesenprüfungen. Durchgeführt wird ein Signifikanztest sowie eine Korrelations- und Faktorenanalyse.

Die Anlage des Untersuchungsplans schränkt die Validität der quantitativen Befunde ein. Da es sich um keine Zufallsstichprobe handelt, bleibt der Einfluss von personenbedingten Variablen unkontrolliert, so dass sich die Aussagen nur auf die untersuchte Gruppe beziehen. Die Grenzen der Aussagefähigkeit der Befunde sind auch dann erreicht, wenn es um kausale Schlussfolgerungen geht. Der gewählte Untersuchungsplan lässt kausale Aussagen aus den ermittelten statistischen Kenndaten nicht zu. Dennoch eignen sich die ermittelten statistischen Kenndaten als explorative Instrumente sehr wohl dazu, Forschungshypothesen zu generieren und vorhandene zu nutzen (vgl. Bortz & Döring 1995 S. 355).

So stehen die Ergebnisse der Korrelations- und Faktorenanalyse im Einklang mit zur Zeit akzeptierten Rahmenmodellen für das Lehr – Lerngeschehen (vgl. Krapp 1996 S. 48, Helmke & Weinert 1997, zitiert in Baumert et al. 2001 S. 33). Nach dem *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsansatz von Krapp wird die individuelle Lernmotivierung neben persönlichkeitsbedingten Variablen von der Qualität der Unterrichtsorganisation bestimmt. Aus dieser Forschungsperspektive bestimmen die Motivationsanreize, die vom aktuellen Unterricht ausgehen, ob der Lerner sich selbstbestimmt wahrnimmt, sich aktiv und engagiert erlebt und sich kompetent und eingebunden fühlt. Untersuchungen von Krapp & Wild (1995) legen nahe, dass ein unmittelbares, positives Erlebnisgefühl während des Lernvorganges ein Hinweis auf eine intrinsische Lernmotivierung ist, die auf den Lerner zurückwirkt, überdauernde Interessen fördert und eine Leistungssteigerung zur Folge hat.

Aus der Faktorenanalyse dieser Untersuchung ergibt sich ein Itembündel, das durch einen *Faktor 1*, der eine sehr hoher Aufklärungsvarianz besitzt, repräsentiert werden kann. Der *Faktor* selbst ist ein statistischer Wert und sagt lediglich aus, dass in der untersuchten Stichprobe die ihm zugeordneten Items sehr ähnlich beantwortet werden. Die inhaltliche Bedeutung des *Faktors* wird in dieser Untersuchung aus der *entwicklungs- und persönlichkeits-theoretischen* Forschungsperspektive

vermutet. Das Rahmenmodell von Krapp (1996 S. 48) legt nahe, dass der ermittelte *Faktor*, der die höchste Aufklärungsvarianz besitzt, die Lernmotivation erfasst. Wird der *Faktor* 1 dieser Untersuchung als Lernmotivation interpretiert, so geht die Lernmotivation nach den Befunden der Faktorenanalyse einher (vgl. Tabelle 35, S. 155)

- mit einer subjektiven Bedeutsamkeit des Lerninhalts,
- mit der selbständigen Erarbeitung,
- mit einer nachvollziehbaren, aufeinander aufbauenden Struktur des Lerninhalts,
- mit einer fairen Bewertung,
- mit der aktuellen Hervorkehrung individueller Interessen,
- mit einer Anstrengungsbereitschaft.

Die Ergebnisse der Befragung zeigen,

- dass der Lerninhalt bedeutsam eingeschätzt wird, bedeutsamer als die Kenntnisse im vorangegangenen Chemieunterricht (vgl. Tabelle 29, S. 145 und Tabelle 38, S.160).
- dass selbständig gearbeitet wurde, selbständiger als es die Mehrzahl der Beteiligten im Chemieunterricht gewohnt war (vgl. Tabelle 26 und 27, S. 143 Tab. 40 und 41, S. 161 sowie Befund des t – Testes, S. 159).
- dass die Beteiligten sich kompetent und selbständig wahrgenommen haben, wobei das Kompetenz- und Autonomieempfinden zunahm (vgl. Tab. 26 und 27, S. 144 Tab. 40 und 41, S. 161).
- dass die Akzeptanz der Experimente und Materialien hoch war, höher als im vorangegangenen Chemieunterricht (vgl. Tabelle 33, S. 147 Tabelle 42, S. 162).
- dass die Bewertung fair war (vgl. Tabelle 44, S.162).

Tendenziell abgenommen haben in der Untersuchungsgruppe der Neugiereffekt und die Bereitschaft sich anzustrengen (vgl. Tabelle 39, S. 160 Tab. 42, S. 162).

### **Kommunikative Validierung der Befunde**

Die vorliegende Untersuchung ist eingebettet in eine qualitative Forschungskonzeption, die *Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung* (vgl. Eilks & Ralle 2002). Im Rahmen der zyklischen Strategie, die ein wesentliches Merkmal der *Partizipativen Fachdidaktischen Forschung* ist, lässt sich die Untersuchung in die zweite Phase der im Modell vorgeschlagenen, aufeinander folgenden Phasen einordnen. Das didaktische Evaluationsmodell sieht mehrere Zyklen der Entwicklung, Erprobung, Evaluation und Überarbeitung pro Phase vor, so dass in einem kommunikativen Prozess Erfahrungen, neue Erkenntnisse oder methodische Varianten einfließen können, die zur Verbesserung der Konzeption dienen. Damit werden die Ergebnisse erneut diskutiert und im Sinn einer kommunikativen Validierung (vgl. Mayring 1999 S. 121) eingeschätzt. Der Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ ist bisher dreimal erprobt und in dieser

Untersuchung evaluiert worden. Weiterer Erprobungen mit anschließenden Evaluationen stehen noch aus, um erneut die Gültigkeit der Aussagen einschätzen zu können.

### **Bewertung der Unterrichtsqualität**

Die kontextorientierte und multiperspektivisch ausgerichtete Unterrichtsorganisation des Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ wird mehrheitlich von den Befragten positiv bewertet.

Nach Einschätzung der Befragten ist der Lerninhalt

- interessant (vgl. Tab. 28, S. 144)
- neu (vgl. Tab. 30, S. 145)
- bedeutsam (vgl. Tab. 29, S. 145 Tab. 37, S. 158),
- hilfreich (vgl. Tab. 29, S. 145),
- im Schwierigkeitsgrad angemessen (vgl. Tab. 31, S. 146).

Die Unterrichtsorganisation fördert nach ihrer Einschätzung

- das Kompetenzerleben (vgl. Tab. 27, S. 143; Tab. 40, S. 161),
- das Gefühl der Selbständigkeit (vgl. Tab. 26, S. 143; Tab. 41, S. 161),
- das Empfinden für soziale Eingebundenheit (vgl. Tab. 26, S. 143; Tab. 41, S. 161),
- die Freude am Experimentieren (vgl. Tab. 42, S. 162; Tab.33, S. 147).

Die Befragten bestätigen, dass die besondere Unterrichtsorganisation

- eine ausreichende Anzahl von Experimenten enthält (vgl. Tab. 33, S. 147),
- einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Experimenten und Phänomen aufweist (vgl. Tab. 33, S. 147),
- angemessene Hilfestellungen vom Lehrer bietet (vgl. Tab. 44, S. 162).

### **Zusammenfassung der Befunde aus der Befragung**

Die Konzeption *Chemie im Kontext* gibt Qualitätsmerkmale vor, die sich auf den Lerninhalt und auf die Lernumgebung beziehen. Werden diese erfüllt, wird der Lerninhalt als subjektiv bedeutsam eingeschätzt, empfinden sich die Lerner als selbständig, kompetent und interessiert und zeigen nach der Lernphase ein differenziertes Wissen, das anschlussfähig ist. Die Lernumgebung verlangt ein eigenständiges Erschließen von Wissen, das Internetrecherchen mit einschließt. Wird die geeignete Lernumgebung geschaffen, geht das einher mit einer Förderung der Medienkompetenz und einer Änderung der Lehrerrolle. Die neue Rolle, die eine moderierend beratende Funktion des Lehrers vorsieht, wird von den Lernern akzeptiert.

Positive Änderungseffekte im Antwortformat der Pre – Post – Befragung zeigen sich bei folgenden Bedingungsfaktoren: Zugenommen haben durch die besondere Unterrichtsorganisation

- das Selbstvertrauen in die eigene Kompetenz und Selbständigkeit (vgl. Tab.40, 41, S. 161),
- die Freude am Experimentieren (vgl. Tabelle 42, S. 162),
- die Bedeutsamkeit des Lernstoffs (vgl. Tabelle 38, S. 160),
- das Angebot professioneller Hilfestellungen (vgl. Tabelle 44, S. 162).

Abgenommen hat die Sicherheit, was an Wissen erwartet wird (vgl. Anhang F 38 – 47: Befunde des t – Testes).

### **Befunde zur Wissensdiagnose**

Die selbständige Erarbeitung der komplexen Zusammenhänge im Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘, führte zu einem Wissenszuwachs, der auch nach vier Monaten problemorientiert angewandt werden konnte. Das Wissen aus dem Lernzyklus ‚Atmen unter Extrembedingungen‘ konnte in einem Begriffnetz als Gruppenwissen dokumentiert werden, ohne dass in einem unmittelbar vorangegangenen Unterricht eine Wiederholung stattgefunden hatte. Von Lehrern, die das Concept-Mapping beobachteten, wurde das profunde Wissen, das im jeweiligen Gruppenprozess rekonstruiert wurde, bestätigt (vgl. Anhang C 162 – 164).

Die erstellten Concept-Maps zeigen, dass die überwiegende Anzahl der Gruppen in der Lage war,

- die Dynamik der sich wechselseitig beeinflussenden Kohlenstoffdioxidgleichgewichte kontextgebunden am Phänomen der Hyperventilation zu beschreiben,
- die Pufferkapazität als ein adäquates Maß für die Güte einer Pufferlösung zu definieren,
- und die Lage des Gleichgewichtes nach erfolgter Störung vorherzusagen (vgl. Anhang C 2-199).

In einer der Untersuchungsgruppen erfolgte vier Monate nach dem Concept-Mapping ein Leistungstest, der von jedem Probanden durchgeführt werden musste. Die Aufgabe war problemorientiert und erforderte ein differenziertes Verständnis des Gleichgewichtskonzepts. Die Einzelleistungen der Untersuchungsgruppe waren sehr unterschiedlich. Insgesamt lag das Ergebnis im befriedigendem Bereich (vgl. Anhang C 209-212). Das war deutlich besser als in einer vorliegenden Untersuchung von Sumfleth (1988).

Profundere Kenntnisse über die Kompetenzen, die eine kontextualisierte, multiperspektivisch und auf das eigenständige Lernen ausgerichtete Unterrichtsorganisation vorbereitet, könnten durch eine Vergleichsstudie erreicht werden. Die Untersuchungsanlage wäre ähnlich zu gestalten wie die PISA - Studie (vgl. Baumert et al. 2001). In der PISA - Studie werden anhand von sinnstiftenden

Aufgaben, die nicht Lehrplaninhalte abtesten, naturwissenschaftliche Basiskompetenzen überprüft. Die Basiskompetenzen bestimmen die naturwissenschaftliche Grundbildung und sind umfassender als das übliche Lehrplanwissen. Sie umfassen den Umgang mit Wissen, das Erschließen von Problemen und die Anwendung von Fähigkeiten. Unter methodischen Gesichtspunkten stellt die PISA – Studie nach Aussage des PISA – Konsortiums den derzeit entwickeltsten Stand der internationalen, empirischen Schulleistungsforschung dar. Würden die Erhebungsmethoden der PISA – Studie auf eine Vergleichstudie mit Experimental- und Kontrollgruppen angepasst, wobei es sich bei der Experimentalgruppe um eine zuverlässige Stichprobe handeln müsste, die nach der Konzeption *Chemie im Kontext* unterrichtet worden wäre, ließen sich profundere Aussagen über die Effizienz einer Unterrichtsorganisation ableiten, die der Konzeption *Chemie im Kontext* folgt.

### **Befunde zum Konzeptverständnis**

Die Filmaufnahmen des Concept – Mappings von zwei Teilgruppen weisen nach, dass das Konzeptverständnis der am Gruppenprozess beteiligten Schüler unterschiedlich ist (vgl. Anhang C 77 und C 6-9). Die Äußerungen von zwei Schülerinnen legen nahe, dass sie kein adäquates Teilchenmodell auf die neue Anwendungssituation übertragen konnten. Ein Teilchenmodell, das die Änderung der Gleichgewichtslage sich wechselseitig beeinflussender Gleichgewichte erklärt, stand ihnen zum Zeitpunkt des Concept-Mappings nicht zur Verfügung. Untersuchungsergebnisse zeigen, dass animierte Visualisierungen den Lernprozess fördern können (vgl. Lewalter 1997 zitiert in Möllenkamp et al. 2001). Davon ausgehend, dass die Verständnisprobleme der Schülerinnen schon in der Lernphase vorhanden waren, scheint es hilfreich zu sein, im Lernprozess selbst eine Computeranimation zur Gleichgewichtseinstellung zu präsentieren. Die Computeranimation zur Gleichgewichtseinstellung wie sie von Krilla & Ralle (2001) entwickelt wurde, bietet einerseits die Möglichkeit, die Gleichgewichtseinstellung nach einer Stoffmengenänderung auf der Teilchenebene quantitativ zu verfolgen, andererseits macht sie aber auch die Besonderheit deutlich, die eine im Gleichgewicht endende Reaktion von einer vollständig ablaufenden Reaktion unterscheidet. In der Untersuchungsgruppe KSN, die softwareunterstützt das Concept-Map erstellte, stand in der Lernphase die Computersimulation zur Gleichgewichtseinstellung zur Verfügung. Da das Instrumentarium zur Concept-Maperstellung in beiden Untersuchungsgruppen wechselte und zur Ergebnissicherung entweder eine Filmdokumentation oder eine anschließende Gruppendiskussion gewählt wurde, können keine Aussagen über Änderungseffekte getroffen werden.

### **Bewertung des gewählten Untersuchungsinstrumentariums**

Diese Untersuchung greift auf qualitative Erhebungstechniken für die nötige Datensammlung zurück. Zur Wissensdiagnose wird das Concept-Mapping gewählt. Die dargestellten Ergebnisse werden unterschiedlich abgesichert. Dazu dienen transkribiertes Filmmaterial, Aktivitätsprotokolle und Gruppendiskussionen der Schüler sowie der Beobachter. Die Verfahrensdokumentation erfasst die Durchführung und Auswertung der Datenerhebung. Im Rahmen dieser Untersuchung werden

zwei Instrumentarien zur Erstellung von Concept-maps genutzt. Das softwareunterstützte Instrumentarium ist auswertungsfreundlicher hat aber den Nachteil, dass keine Begriffe zugewählt werden können und eine Auswahl von Verknüpfungen vorgegeben ist. Damit findet eine stärkere externe Steuerung der Testpartnernetze statt, die sich möglicherweise in der Qualität der erstellten Netze niederschlägt. Hinzu kommt, dass eine vom Programm vorgegebene Bewertung ein Expertennetz verlangt, das im Nachhinein an die Testpartnernetze angepasst werden muss. Um eine adäquate Rankingliste zu erstellen, muss das Expertennetz alle Verknüpfungen enthalten, die auch die Schülernetze auszeichnet. Die Objektivierung der Bewertung ist eingeschränkt. Einerseits wird nicht berücksichtigt, dass die von den Testpartnern gewählten Propositionen unterschiedlich und dennoch gleichwertig sein können, aber alternativ getroffen werden können. Andererseits wird die Aussagekraft des Vergleichsindex eingeschränkt, wenn zu viele Verknüpfungen vorliegen (vgl. Eckert 1998 S. 94).

Die Aktivitätsprotokolle der Beobachter (vgl. Anhang C 194, 190, 185, 181) verweisen darauf, dass die Auswahl der Karten den Lernerfolg mitbestimmt, und das gilt sowohl für das softwareunterstützte wie auch für das *Paper – pencil* – Verfahren. In dieser Untersuchung lassen sich die vorgegebenen Karten in zwei Kategorien einordnen. Zum einen sind es Karten, die einen hohen Erklärungswert besitzen. Zum anderen handelt es sich um Karten, die Vorgänge beschreiben oder Größen angeben. Diejenigen Schüler, die erkennen, dass es Karten mit unterschiedlicher Qualität gibt, zeigen eine höhere Transferleistung. Für leistungsschwächere Schüler sind die Karten mit unterschiedlichem Erklärungswert eine Erschwernis. Bei der Kartenvorgabe sind daher sowohl die fachlichen Informationen wie auch ihre Erklärungswerte zu berücksichtigen.

### **Befunde zur Gruppenarbeit**

Das selbständige Lernen in Gruppen wird von 80% der Befragten positiv bewertet. Ebenso hoch ist die Akzeptanz der Gruppenarbeit beim Erstellen von Concept-Maps. Empirische Untersuchungen zum kooperativen Lernen zeigen, dass in den meisten Fällen ein höherer Lernerfolg nachzuweisen ist, wenn kooperativ gelernt wird (vgl. Eilks 2003 S. 54). Bestätigt wird das von den Lehrkräften, die das Concept-Mapping beobachteten (vgl. Anhang C 162 – 165). Sie führten die hohe Qualität des gezeigten Wissens auf die kooperative Zusammenarbeit der Schüler und Schülerinnen während der Maperstellung zurück. Ein Beobachter verwies darauf, dass er einen Schüler beobachtete, der eigenständig das geforderte, relationale Wissen entwickelte ohne den Diskurs mit den anderen zu nutzen.

20% der Befragten waren mit der Gruppenarbeit in den Lernstationen unzufrieden. Anzunehmen ist, dass prinzipiell kooperatives Lernen als Unterrichtsorganisation nicht in Frage gestellt wird. Dafür spricht, dass Teamfähigkeit eine Sozialkompetenz ist, die gesellschaftlich nachhaltig gefordert wird. Zur Unzufriedenheit führen die Fehlentwicklungen, die mit dem kooperativen

Lernen verknüpft sein können. Aus den offenen Antwortformaten der Fragebögen ist zu entnehmen, dass als Gründe mehrfach ungleiche Arbeitsverteilungen und damit verknüpfte nicht nachvollziehbare Bewertungen angeführt werden. Bemängelt wird nicht nur eine ungerechte Bewertung der Arbeitsergebnisse, sondern auch eine fehlende Orientierung im Lernprozess selbst. Bestätigt wird dies durch das Ergebnis des Signifikanztests. Der unterschiedlich ausgeprägte Wunsch nach Sicherheit im Lernen ist durch individuell geprägte Lernstilformen und Lernstrategien erklärbar.

Es gibt unterschiedliche Modelle, die verschiedene Lernstile beschreiben. Das Modell von Pask (1988 S. 83 - 100) geht von zwei Lernstilen aus. In diesem dualistisch ausgerichteten Ansatz unterscheidet er zwischen *Serialisten* und *Holisten*. Die einen nähern sich mit aufeinanderfolgenden Schritten einem Gesamtverständnis, die anderen verschaffen sich ein Gesamtbild und konzentrieren sich auf komplexe Zusammenhänge, bevor sie die Details betrachten.

Zu untersuchen bleibt, ob und unter welchen Bedingungen in einer multimedialen Lernumgebung die Möglichkeiten genutzt werden können, um beiden Lernstilen und möglichen Zwischenformen gerecht zu werden. Zu untersuchen bleibt auch, welche Variablen die Gruppenarbeit stören können. Da die Lernmotivierung das Lernergebnis mitbestimmt und die subjektive Erlebnisqualität auf die Art der Motivierung schließen lässt, ist zu erwarten, dass längerfristig Auswirkungen auf die Leistungen erkennbar werden, wenn die Unzufriedenheit mit den Bedingungen im Lernprozess erhalten bleibt (vgl. Helmke & Weinert 1997). Ist die Kommunikation deshalb gestört, weil die Lernstile und Lernstrategien der einzelnen zu unterschiedlich sind und ganzheitlich orientierte Lerner vergessen, sich mitzuteilen und damit ihre tutoriellen Aufgaben in der Gruppe vernachlässigen? Oder ist möglicherweise die Kontextperspektive zu umfassend, so dass dem Bedürfnis nach Sicherheit im Lernen nicht nachgekommen wird? Es bleibt auch die Frage offen, welchen Beitrag multimediale Lernumgebungen leisten, um den individuellen Lernstilen und Lernstrategien gerecht zu werden, so dass beim Lernen dem Bedürfnis nach Selbstregulation und dem Bedürfnis nach Steuerung durch vorgegebene Hilfen nachgekommen werden kann.

## 6. Literaturverzeichnis

- Aebli, H. (1982). *Denken: Das Ordnen des Tuns*. Band II: Denkprozesse. Stuttgart: Klett.
- Altrichter, H., Posch, P. (1998). *Lehrer erforschen ihren Unterricht. Eine Einführung in die Methoden der Aktionsforschung*. 3. Auflage. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Arnold, R. & Siebert, H. (1999). Konstruktivistische Erwachsenenbildung von der Deutung zur Wirklichkeit. - in *Grundlagen der Berufs – und Erwachsenenbildung*. Band 4. Hohengehren: Schneider.
- Atkins, P.W. & Beran, J.A. (1998). *Chemie einfach alles*. 2. Auflage. Weinheim: VCH.
- Bader, H.J. & Juchelka, S. (1997). Woraus besteht Schokolade? *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 46 (6), 2-9.
- Balgo R. & Voß, R. (1999). Einladung zu einem systemisch konstruktivistischen Sichtwechsel. - in : Voß R. (Hrsg.) *Die Schule neu erfinden* (S.56-69) 3. Auflage. Neuwied: Luchterhand.
- Bargel, T., Franheim-Peisert, G. & Sandberger, J.U. (1989). *Studienerfahrungen und studentische Orientierungen in den 80er Jahren. Trends und Stabilitäten*. Bonn: Bock.
- Bauer, V. & Melle I. (1999). Die Analyse von Fettsäuren. *MNU* 52 (4), 225 ff.
- Baumann, P. & Marweg-Hanke, M. (1999). Versuchseinheiten Chemie. Lebensmittelchemie. *Phywe Schriftenreihe*. 1. Auflage. Göttingen: Phywe Systeme.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M. et al. (1997). *TIMSS – Mathematisch – naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*. Deskriptive Befunde. Opladen: Leske und Budrich.
- Baumert, J. et al. (1997). Expertise „Steigerung der Effizienz des mathematisch – naturwissenschaftlichen Unterrichts“. [http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/blk\\_prog/gutacht/gut7.htm](http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/blk_prog/gutacht/gut7.htm).
- Baumert, B., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.J. & Weiß, M. (Hrsg) (2001). Pisa 2000. Opladen: Leske + Budrich.
- Baumert, B., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.J. & Weiß, M. (Hrsg) (2000). Pisa 2000 Zusammenfassung. Opladen: Leske + Budrich.
- Belitz, H. D., Grosch, W. & Schieberle, P. (2001). *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. 5. Auflage. Berlin et al.: Springer.
- Benware, C.A. & Deci, E.L. (1984). Quality of learning with an active versus passive motivational set. *American Educational Research Journal* 21, 755 – 765.
- Berliner, D.C. (1992). Telling the Stories of Educational Psychology. *Educational Psychologist* 27 (2), 143-161.
- Bergmeyer, U. (1970). *Methoden der enzymatischen Analyse*. Band 1. Weinheim: Chemie.
- Beuren, A. (1997). Anabolika. *Unterricht Biologie*, 21 (229), 21 ff.
- Beyermann, K. (1993). *Chemie für Mediziner*. 7. Auflage. Stuttgart: Thieme.
- Bielefeld, J. (2001). Leichter wird nur der Geldbeutel. *Frankfurter Rundschau* 43, Dienstag, 20. Februar, 25.
- Bösche-Teuber, R. (1998). Uns geht's iod – gesünder mit Iodsalz. *Unterricht Biologie*, 22 (240), 25- 34.
- Bortz, J.(1995). *Forschungsmethoden und Evaluation*. 2. Auflage. Berlin: Springer.
- Bortz, J. (1993). *Statistik*. 4. Auflage. Berlin: Springer.
- Bortz, J. (1999). *Statistik*. 5. Auflage. Berlin: Springer.

- Boyle, T. C. (1996). *Wassermusik*. Reinbeck: Rororo.
- Bracht, A. (1996). *Zellbiologie*. Natura Lehrerband. Stuttgart: Klett.
- Brandt, L., Elen, J., Hellemans, J., Heerman, L., Couwenberg, I., Volckaert, L. & Morisse, H. (2001). The impact of concept mapping and visualization on the learning of secondary school chemistry students. *International Journal Science Education* 23 (12), 1303-1313.
- Braun, T.M. (1990). Portrait eines Biokatalysators: Carboanhydrase A. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 39 (3), 9ff.
- Braun, U. (1974). *Die Muskatnuss als Rauschdroge, Analytische Untersuchungen zur Biotransformation von Myristicin und Elemicin unter besonderer Berücksichtigung möglicher Animierungsprodukte*. Bonn: Richard Schwarzbild.
- Brettschneider, V. (1997). *Die Bedeutung von Netzwerken für die Vermittlung von Zusammenhängen im Rahmen wirtschaftsberuflicher Umweltbildung*. (Dissertation Universität Paderborn). Frankfurt: Haag und Herchen.
- Brian, M. (2000). *Essen auf Rezept*. Stuttgart: Hirzel.
- Bruhn, J. Fischer, F., Gräsel, C. & Mandl, H. (2000). Kooperatives Lernen mit Mapping – Techniken. - in H. Mandl & F. Fischer (Hrsg.) *Wissen sichtbar machen* (S. 119-136). Göttingen: Hogrefe.
- Bublath, J. (1995). *100xKnoffhoff*. 2. Auflage. München: Heyne.
- Claasen, H., Hauer, R., Klügel, E. & Reinhardt, U. (1982). Niedersächsisches Schulgesetz (NSchG)-Handkommentar. Hannover et al..
- Christen, H. R. (1997). Chemie – faszinierend oder ein Horrorfach? *CHEMKON*, 4 (3), 175- 180.
- Csikszentmihalyi, M. & Schiefele, U. (1993). Die Qualität des Erlebens und der Prozess des Lernens. *Zeitschrift für Pädagogik*, 39, 207-221.
- Czihak, G., Langer, H. & Ziegler, H. (Hrsg.) (1996). *Biologie*. 6. Auflage. Berlin et al.: Springer.
- Deci, E.L. (1992). The relation of interest to the motivation of behaviour. A self-determination theory of perspective. - in K.A. Renninger, S. Hidi & A. Krapp (Hrsg.) *The role of interest in learning and development* (S. 43-47). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Demuth, R., Schenzer, M., Janzen, M. (1995). *Chemische Grundversuche ohne Umweltbelastung. Sek. II*. Köln: Aulis.
- Duit, R. (1996). Lernen als Konzeptwechsel im naturwissenschaftlichen Unterricht. - in R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg) *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 145 – 162). Kiel: IPN.
- Eckert, A. (1998). Kognition und Wissensdiagnose. Die Entwicklung und empirische Überprüfung des computergestützten wissensdiagnostischen Instrumentariums Netzwerk-Elaborierungs-Technik. - in A. Buchner & J. Funke (Hrsg) *Aktuelle Psychologische Forschung* Band 25. Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Ehm, O. (1991). *Tauchen*. Stuttgart, Wien: Müller Rüslikon Verlags - AG.
- Eilks I. & Ralle, B. (2002). Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung. *CHEMKON*, 1, 13-18.
- Eilks.I. (2003). Kooperatives Lernen im Chemieunterricht (Teil1). *MNU* 56 (1), 51- 54.
- Eilks.I. (2003). Kooperatives Lernen im Chemieunterricht (Teil2). *MNU* 56 (2), 111-114.
- Eisenbarth, O., Kohler H. & Kurtz, H. (1982). *Praktikum Chemie. Experimentelles Arbeiten in der Sekundarstufe II*. Stuttgart: Klett.
- Engelkamp, J. (1990). *Das menschliche Gedächtnis*. 2. Auflage. Göttingen: Hogrefe.
- Emsley, J. (1997). *Parfum, Portwein, PVC*. Weinheim: Wiley-VCH, 95-101.
- Fischer-Blunk L. (1979). *Lipide und Tenside*. Studienbücher Chemie. 1. Auflage. Frankfurt: Moritz Diesterweg.

- Fischer, F. (1998). *Mappingverfahren als kognitives Werkzeug*. Frankfurt: Lang.
- Fischer, F. & Mandl, H. (Hrsg.) (2000). *Wissen sichtbar machen*. Göttingen: Hogrefe.
- Fischler, H. & Peukert, J. (Hrsg.) (2000). *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie*. Berlin: Logos.
- Fischler, H. (1996). Das Atommodell im Unterricht. - in R. Duit (Hrsg.) *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel: IPN.
- Frankfurter Rundschau* (2001) Nr.289/12. Dezember, S.22.
- Frankfurter Rundschau* (2001) Nr.157/10.Juli, S.25.
- Franisk, R. (1993). Dem Fett zu leibe rücken. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*.42 (3), 2-7.
- Friedrichs, J. (1990). *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 14. Auflage. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Gasser, R. (1999). *Die Kreta – Diät*. Niedernhausen: Falken.
- Gaw, A., Cowan, A.R., O'Reilly, D., St.J., Stewart, M. J. & Shepherd, J. (1999). *Clinical Biochemistry*. 2. edition. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- von Glaserfeld, E. (1994). Piagets konstruktivistisches Modell: Wissen und Lernen. - in G. Rusch & S.J. Schmidt (Hrsg.) *Konstruktivismus: Geschichte und Anwendung* (S.17 - 42). Frankfurt: Suhrkamp.
- von Glaserfeld, E. (1992a). Aspekte des Konstruktivismus: Vico, Berkeley, Piaget. - in G. Rusch & S.J. Schmidt (Hrsg.) *Konstruktivismus: Geschichte und Anwendung* (S.17 - 42). Frankfurt: Suhrkamp.
- von Glaserfeld, E. (1992b). Konstruktion der Wirklichkeit und des Begriffs der Objektivität. - in H. von Forster, E. von Glaserfeld, P.M., Heijl, S. J. Schmidt, & P. Watzlawick *Einführung in den Konstruktivismus* (S. 9-39). München: Pieper.
- Gräber, W. (1992). Untersuchungen zum Schülerinteresse an Chemie und Chemieunterricht. *Chemie in der Schule*, 39 (7/8), 270ff.
- Grzesik, J. (1994). *Unterricht: Der Zyklus vom Lernen*. Stuttgart: Klett.
- Guerciolini, R. (1997). Mode of action of orlistat. *International Journal of Obesity* 21 (3), S. 15 ff.
- Haberkost, A. & Deutschmann, F. (1999). Chemische Untersuchung von Blut. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 48 (7), 38-44.
- Häubler, P., Bündler W., Duit, R., Gräber, W. & Mayer, J. (1998). *Perspektiven für die Unterrichtspraxis*. Kiel: IPN.
- Häubler, P., Hoffmann, L. (1995a). Physikunterricht – an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert. *Unterrichtswissenschaften*, 23(2), 107-126.
- Helmke, A & Weinert, F. E. (1997). Bedingungsfaktoren schulischer Leistungen. - in F. E. Weinert (Hrsg.) *Psychologie des Unterrichts und der Schule* (S. 71 – 176) *Enzyklopädie Psychologie, Serie Pädagogische Psychologie, Bd. 3*. Göttingen: Hogrefe.
- Hedewig, R. (1991). Katalase – eines der wirksamsten Enzyme. *Unterricht Biologie* 15 (168), 42 ff.
- Heinecke, C. (1997). Lernen im Chemieunterricht als Vorstellungswechsel. *MNU* 50 (6), 330 ff.
- Houston, C.S. (1992). Die Höhenkrankheit. *Spektrum der Wissenschaft* (12), 64-70.
- Hoffmann, I & Ralle, B. (2001). Atmen unter Extrembedingungen. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 50 (1), 16 – 22.
- Hoffmann, L. & Lehrke, M. (1986). Eine Untersuchung über Schülerinteressen an Physik und Technik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 32, 189-204.

- Hucke, L. & Fischer H. (2000). Wissenserwerb und Handlungsregulation im physikalischen Praktikum. - in: H. Fischler & J. Peukert (Hrsg.) *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S. 57-90). Berlin: Logos.
- Huntemann, H. & Parchmann, I. (1998). Biologisch abbaubare Kunststoffe- ein neues Konzept für den Chemieunterricht. - in Kometz, A. (Hrsg.) *Chemieunterricht im Spannungsfeld Gesellschaft – Chemie – Umwelt*. Berlin: Cornelsen.
- Huntemann, H., Honkomp, H., Parchmann, I. & Jansen, W. (2001). Die Wasserstoff- Luft – Brennstoffzelle mit Methanolsplaltung zur Gewinnung von Wasserstoff – Der Fahrzeugantrieb der Zukunft. *CHEMKON*, 8 (1), 15 – 21.
- Huntemann, H., Baumann, M., Parchmann, I. & Schmidkunz, H. (2001). Effiziente Energienutzung mit Latentwärmespeichern. *CHEMKON*, 9 (2), 77 – 85.
- Huntemann, H. & Parchmann, I. (2000). Biologisch abbaubare Kunststoffe- ein neues Konzept für den Chemieunterricht. *CHEMKON* 7 (1) 15 – 21.
- Huntemann, H., Stöver, M., Rebentisch, D. & Parchmann, I. (2000). Das Auto heute und morgen. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 49 (8), 22- 29.
- Huntemann, H., Haarmann, H. & Parchmann, I. (2000). Schüleraussagen zur Unterrichtsreihe ‚Treibstoffe in der Diskussion‘. Eine erste Untersuchung zur Wirksamkeit von Chemie im Kontext. *CHEMKON* 7(3), 131-136.
- Huntemann, H., Vennemann, H. & Paschmann, I. (2000). Ein Auto ohne Kunststoffe? Eine Unterrichtseinheit aus der Konzeption Chemie im Kontext. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*, 49 (4), 19 ff.
- Huntemann, H., Paschmann, A., Parchmann, I. & Ralle, B. (1999). Chemie im Kontext - ein neues Konzept für den Chemieunterricht? *CHEMKON* 6 (4), 191 – 196.
- Jansen, W., Ralle, B. & Peper, R. (1984). *Reaktionskinetik und chemisches Gleichgewicht*. Köln: Aulis.
- Jonassen, D.H., Beissner, K. & Yacci, M. (1993). *Structural knowledge. Technique für representing, conveying, and acquiring structural knowledge*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Kicinski, H.G. (1999). Versuchseinheiten Chemie- Dünnschichtchromatographie. *Phywe Schriftenreihe*. 1. Auflage. Göttingen: Phywe Systeme.
- Kleber, H. P. & Schlee, D. (1991). *Biochemie* Teil 1. 2. Auflage. Jena: Gustav Friedrich.
- Krakauer, J. (1999). *In eisigen Höhen*. 14. Auflage. München: Piper.
- Krapp, A. (1999). Intrinsische Lernmotivation und Interesse. *Zeitschrift für Pädagogik* 45 (3), 387 – 406.
- Krapp, A. (1996). Psychologische Bedingungen naturwissenschaftlichen Lernens. Untersuchungsansätze und Befunde zu Motivation und Interesse. - in R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg) *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 37 - 68). Kiel: IPN.
- Krapp, A. & Wild, K.-P. (1995). Zwischenbericht über das Forschungsprojekt “Bedingungen und Auswirkungen berufsspezifischer Lernmotivation in der kaufmännischen Erstausbildung“. München: Universität der Bundeswehr München.
- Krapp, A., Schieferle, U. & Wild, K.-P. (1993). Bedingungen und Auswirkungen berufsspezifischer Lernmotivation in der kaufmännischen Erstausbildung. Neuantrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Lehr-Lern-Prozesse in der kaufmännischen Erstausbildung“. München: Universität der Bundeswehr München.
- Krilla, B. & Ralle, B. (2001). Gleichgewichtseinstellung. [www.chik.de](http://www.chik.de)
- Kromrey, H. (1985). *Empirische Sozialforschung*. 7. Auflage. Opladen: Leske + Budrich.

- Kromrey, H. (2000). *Empirische Sozialforschung*. 9. Auflage. Opladen: Leske + Budrich.
- Kubli, F. (1998). *Plädoyer für Erzählungen im Physikunterricht*. Köln: Aulis.
- Lakotta, B. (2001). Der Club der dünnen Jungen. *Spiegel*, 40, S.208-212.
- Lamnek, S. (1995). *Qualitative Sozialforschung*. Band 1. Methodologie. 3. Auflage. Weinheim: Psychologie Verlagsunion.
- Lamnek, S. (1995). *Qualitative Sozialforschung*. Band 2. Methoden und Technik. 3. Auflage. Weinheim: Psychologie Verlagsunion.
- Lehninger, A., Nelson, D. & Cox, M. (1998). *Prinzipien der Biochemie*. 2.Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum.
- Lehrke, M. (1999). TIMSS: Eine Studie und ihre Ergebnisse. *Unterricht Physik*, 54, 7-9.
- Lewalter, D. (1997). Lernen mit Bildern und Animationen. - in D. H. Rost (Hrsg) *Pädagogische und psychologische Entwicklungspsychologie*, Band 2. Münster: Waxmann.
- Lewin, M. (1953). Tat – Forschung und Minderheitenprobleme. - in K. Lewin. *Die Lösung sozialer Konflikte* (S. 278-298). Bad Nauheim: Christian Verlag.
- Leydendecker, K. (2001). Diät wozu? *Stern*, 20, 48- 58.
- Lindenblatt, F., Jung, W. (1999). Handbuch Glasmantel. *Phywe Schriftenreihe*. 1. Auflage. Göttingen: Phywe Systeme.
- Liu, X & Hinchey, M. The international consistency of concept mapping scoringscheme and its effects on prediction validity. *International Journal of Science Education* 18 (8), 921-937.
- Löffler, G. (2000). *Basiswissen der Biochemie mit Pathologie*. 4. Auflage. Berlin et al.: Springer.
- Luczak, H. (1999). Der Stoff aus dem die Pfunde sind. *GEO* (6), 56 ff.
- Mandl, H, Gruber, H. Renkl, A. (1997). Situiertes Lernen in mulimedialer Umgebung. - in: L.J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.) *Information und Lernen mit Multimedia* (S. 169-178). 2. Auflage. Weinheim: Beltz.
- Mandl, H., Gruber, H, Renkl, A. (1995). *Situiertes Lernen in multimedialen Lernumgebungen*. Forschungsbericht 50. München: Universität München, Institut für Pädagogische Psychologie und empirische Pädagogik.
- Mandl, H. & Ballstaedt, St.-P.(1986). Assessment of concept-building in text comprehension. - in F. Klix & H. Hagendorf (Eds) *Human memory and cognitive capabilities Mechanisms and performance* (S. 861-870).
- Marees, H. (1989). *Sportphysiologie - Medizin heute*. 6. Auflage. Köln-Mühlheim: Tropon.
- Matschke, H.-D.(1978) Energie und Materie. in Niedersächsischer Kultusminister (Hrsg) *Handreichungen für den Sekundarbereich II mathematisch-naturwissenschaftliches Aufgabenfeld C* 3.Folge (S. 142-144). Hannover: Presse und Informationsdienst.
- Mayring, P. (1999). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. 4. Auflage. Weinheim: Beltz Psychologische Verlags Union.
- Melle, I. (1999). Energie und nachwachsende Rohstoffe als Thema in der Oberstufe. *MNU*, 52, 414-421.
- Möllenkamp, H., Krilla, B. & Ralle, B.(2001). Computerunterstützte dynamische Visualisierungen von Reaktionsmechanismen für den Chemieunterricht. *MNU*, 54, 224-229.
- Moon, R.E., Vann, R.D. & Bennett, P.B. (1995). Die Physiologie der Dekompressionskrankheit. *Spektrum* (10), 72-81.
- Mutschler, E. (1997). *Arzneimittelwirkungen Lehrbuch der Pharmakologie und Toxikologie*. 7. Auflage. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.

- Novak, J. D. (1998). *Learning, Creating and Using Knowledge: Concept maps as Facilitative Tools in Schools and Corporations*. London et al.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Novak, J.D. (1990). Concept mapping: A Useful tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching* 27 (10), 937-949.
- Novak, J.D. & Gower, D. B. (1984). *Learning how to learn*. New York: Cabridge University Press.
- Novak, J.D.(1985). Metalearning and Metaknowledge strategies to help students learn how to learn. - in L.H.T. West, & A. L. Pines (Eds) *Cognitive structure and conceptual change* (pp. 189-209). Orlando et al: Academic Press, Inc.
- Parchmann, I., Demuth, R. & Ralle, B. (2001). Chemie im Kontext – Begründung und Realisierung eines Lernens in sinnstiftenden Kontexten. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*, 50 (1), 2-7.
- Parchmann, I., Ralle, B. & Demuth, R. (2000). Chemie im Kontext – eine Konzeption zum Aufbau und zur Aktivierung fachsystematischer Strukturen in lebensweltorientierten Fragestellungen. *MNU* 53(3), 132 –137.
- Parchmann, I. & Ralle, B. (1998). Chemie im Kontext – ein Konzept zur Verbesserung der Akzeptanz von Chemieunterricht? - in A. Kometz (Hrsg.) *Chemieunterricht im Spannungsfeld Gesellschaft – Chemie – Umwelt* (S.12ff). Berlin: Cornelsen.
- Paschmann, A. (2001). Ks – Wert – Bestimmung des Kohlenstoffdioxid – Hydrogencarbonat – Gleichgewichts. *CHEMKON*, 8 (4), 203 – 204.
- Paschmann, A., de Vries, T., Lüchtenborg, K. & Arshadi, N. (2000). Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffkreislauf. *MNU*, 53 (3), 170 - 174.
- Paschmann, A., de Vries, T., Lüchtenborg, K. & Arshadi, N. (2000). Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffkreislauf. *MNU*, 54 (4), 227 – 230.
- Pask, G. (1976). Styles and Strategies of Learning. *British Journal of Educational Psychology*, 128-148.
- Peuckert, J. & Fischler, H. (2000). Concept Maps als Diagnose- und Auswertungsinstrument in einer Studie zur Stabilität und Ausprägung von Schülervorstellungen. - in H. Fischler & J. Peuckert (Hrsg.) *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S.91-116). Berlin: Logos.
- Piaget, J., Inhelder, B. (1974). *Gedächtnis und Intelligenz*. Olten.
- Piaget, J. (1976). *Die Äquilibration kognitiver Strukturen*. Stuttgart: Klett.
- Pilling G. & Waddington , D. (1997). Ein neuer Chemiekurs: In die Zukunft blicken. *CHEMKON* 4 (1), S 13-18.
- Pollmer, U. & Warmuth, S.(2000).*Lexikon der Populären Ernährungswissenschaften*. Frankfurt: Eichborn.
- Rasche, R. (1998). Der Anstoß von „oben“ ist als Impuls „unten“ angekommen. *Frankfurter Rundschau* 78, 02.04., S.6.
- Rathunde, K. (1992). Serious play: Interest and adolescent talent development. - in A. Krapp & M. Prenzel (Hrsg) *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze einer pädagogisch – psychologischen Interessenforschung* (S. 137-164). Münster: Aschendorff.
- Rathunde, K. (1993). The experience of interest: A theoretical and empirical look at its role in adolescent talent development. - in M. Maehr & P.R. Pintrich (Hrsg) *Advances in motivation and achievement* (pp59-98). London: Jai Press.
- Rehner, R. & Daniel, H. (1999). *Biochemie der Ernährung*. Heidelberg et al.: Spektrum
- Rick, W. (1989). *Klinische Chemie und Mikroskopie*. Berlin et al.: Springer.

- Rikus, U., Menke, K. (2001). Aufgabe pur: Enthält Hefe Carboanhydrase? *Unterricht Biologie* 25 (268), 52-53.
- Rikus, U. (1998). Carboanhydrase – ein Enzym, viele Wirkungen. *Unterricht Biologie* 22 (238), 41- 47.
- Richter, R. (2002). Aufstieg in schwindelnde Höhen. *Unterricht Biologie* 26 (277), 35-42.
- Roeder, P.M. (1989). Bildungsreform und Bildungsforschung: Das Beispiel der gymnasialen Oberstufe. *Empirische Pädagogik* 3(2), 119-142.
- Ruiz-Primo, M. A. & Shavelson, R.J., (1996). Problems and issues in the use of concept maps in science assessment. *Journal of Research in Science Teaching* 33, 569-600.
- Schecker, H. & Kliene E. (2000). Erfassung physikalischer Kompetenz durch Concept-Mapping-Verfahren. - in: H. Fischler & J. Peukert (Hrsg) *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S. 23-49). Berlin: Logos.
- Schiefele, U. & Schreyer, I. (1994). Intrinsische Lernmotivation und Lernen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* 8, 1-13.
- Schnotz, W. (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten*. München: Psychologie Verlags Union .
- Schmidkunz, H. (1995). Die Bewertung der Chemie durch Schülerinnen und Schüler. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 6(7), 9-11.
- Schmidt, S., Rebentisch R. & Parchmann, I. (2003). Chemie im Kontext auch für die Sekundarstufe I: Cola und Ketchup im Anfangsunterricht. *CHEMKON* 10 (1), 6 – 16.
- Schmidt, R., Thews, G. & Lang, F. (Hrsg) (2000). *Physiologie des Menschen*. 28. Auflage. Berlin et al.: Springer.
- Silbernagl, S. & Despopoulos, A. (1979). *dtv - Atlas der Physiologie*. Stuttgart: Thieme.
- Stübs, R. (1998). Computergestützte Bestimmung der Brennwerte von Lebensmitteln. *CHEMKON* 5 (2), 79 ff.
- Stollorz, R. (2001). Das Wunder Verdauung. *Geo Wissen* (28), 85 ff.
- Stork, H. (1995). Was bedeuten die aktuellen Forderungen “Schülervorstellungen berücksichtigen, ‘konstruktivistisch’ lehren!” für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe I? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 1, 15-28.
- Stryer, L. (1999). *Biochemie*. 4. Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum.
- Stoddart, T., Abrams R., Gasper E. & Canaday, D. (2000). Concept maps assessment in science inquiry learning – a report of methodology. *International Journal of Education* 22 (12), 1221 –1246.
- Sumfleth, E (1988). Lehr- und Lernprozesse im Chemieunterricht. - in R. Biermann et al. (Hrsg), *Studien zur Pädagogik der Schule* Band 15. Frankfurt: Peter Lang.
- Trechow, L.P. (2001). Durch dick und dünn. *Frankfurter Rundschau*, 157, S. 25.
- Tamir, P (1998). Assessment and evaluation in science education: oppotunities to learn and out comes. - in: B.J. Fraser & K.G. Tobin (Hrsg) *International Handbook of Science Education* (pp 759-789). Dordrecht: Kluwer.
- Tent, L. & Stelzl, I. (1993). *Pädagogisch – psychologische Diagnostik. Theoretische und methodische Grundlagen*. Band 1. Göttingen: Hogrefe.
- Tergan, S.-O. (1988). Qualitative Wissensdiagnose – Methodologische Grundlagen. - in H. Mandl & H. Spada (Hrsg.) *Wissenspsychologie* (S.400-422). München et al.: Psychologie Verlags Union.
- Tergan, S.-O. (1989a). Psychologische Grundlagen der Erfassung individueller Wissenspräsentationen. Teil 1: Grundlagen der Wissensmodellierung. *Sprache und Kognition* 8 (3) 152-165.

- Tergan, S.-O. (1989b). Psychologische Grundlagen der Erfassung individueller Wissenspräsentationen. Teil 2: Methodologische Aspekte. *Sprache und Kognition* 8, (4) 193-202.
- Tügel, H. Sekundäre Pflanzenstoffe. Die neue Ess – Klasse. *Geo Wissen* (28), 38.
- Voß, R. & Balgo, R. (1999). Wenn das Lernen der Kinder zum Problem gemacht wird. - in R. Voß (Hrsg.) *Die Schule neu erfinden* (S.56-69). 3. Auflage. Neuwied: Luchterhand.
- Wambach, H. (Hrsg) (1993). *Materialienhandbuch Kursunterricht Chemie*. Band 3. Köln: Aulis.
- Weber, S. (1994b). Evaluation of Knowledge Structures by Procedures of Networking – in the Context of Commercial Education. - in D. Redmann (Eds) *AERA vocational education special interest Group: Proceedings. Annual Meeting in New Orleans, Louisianne* (pp 282–300). USA: Louisiana State University.
- Weber, S. & Schumann, R. (2000). Das Concept Mapping Software Tool (COMASOTO) zur Diagnose strukturellen Wissens. - in H. Mandl & F. Fischer (Hrsg) *Wissen sichtbar machen* (S.158–171). Göttingen: Hogrefe.
- Wehr A. (2000). An den Pfunden arbeiten. Mit Lipasehemmung. *Arzt und Wirtschaft*. Ausgabe 1, 2 -3.
- West, L.H.T., Fensham, P.L. & Garrard, J.E. (1985). Describing the cognitive structure of learners following instruction in chemistry. - in L.H.T. West & A.L. Pines (Eds) *Cognitive structure and conceptual change* (pp 61–90). Orlando et al.: Academic Press.
- Weindruch, R. (1996). Länger leben bei karger Kost? *Spektrum der Wissenschaft* (3),78.
- Wild, K.P. & Krapp, A. (1996). Die Qualität subjektiven Erlebens in schulischen und betrieblichen Lernumwelten. Untersuchungen mit der Erlebens – Stichproben – Methode. *Unterrichtswissenschaft* 24, 195-216.
- Woest, V. (1997). Der ungeliebte Chemieunterricht? Ergebnisse einer Befragung von Schülern der Sekundarstufe II. *MNU* 50 (1), 51 ff.
- Wöckel, L. & Schmidt, M. H. (2002). Magersucht, Bulimie und Adipositas. *Biologie in unserer Zeit* 32 (6), 362 – 369.
- Wörn, A, Melle, I. & Bader, J. (1998). Einfache Stofftrennung am Beispiel Schokolade. *CHEMKON* 6, 25.
- Wolfram, G. (2001). Vollwertige Ernährung schützt. *Biologie in unserer Zeit* 31 (6), 388 – 397.
- Ziehe, T. & Stubenrauch, H. (1982). *Plädoyer für ungewöhnliches Lernen*. Reinbeck.
- Zipes, J. (1995). *Creative Storytelling*. New York: Routledge.

## Internetadressen zu den Kapiteln 3.3 und 3.4

**Alle Ausdrücke der Internetadressen liegen auf einer dem Anhang beigelegten CD vor. Die Reihenfolge der Ausdrücke entspricht der Folge im Internetadressenverzeichnis.**

- Anorexia nervosa (Magersucht). [www.medicine-wordwide.de/krankheiten/psychische\\_krankheiten/anorexia.html](http://www.medicine-wordwide.de/krankheiten/psychische_krankheiten/anorexia.html) (letzter Zugriff: 27.02.2002).
- Adipositas. [www.dr.-walser.ch/index.html?adipositas.htm](http://www.dr.-walser.ch/index.html?adipositas.htm) (letzter Zugriff: 20.06.2003)
- Barotrauma: [www.tauchdokter.de/inausohr.html](http://www.tauchdokter.de/inausohr.html) (letzter Zugriff: 20.06.2003)
- Barotrauma. [www.tauchdokter.de/baro.html](http://www.tauchdokter.de/baro.html) (letzter Zugriff: 20.06.2003)
- Barotrauma des Ohrs. [www.cabana.net/Snoopy/barotrauhm](http://www.cabana.net/Snoopy/barotrauhm) (letzter Zugriff: 25.04.2000).
- Blatzheim, U. Die Bläschenerkrankung. [www.netcologne.de/kfc/deko.htm](http://www.netcologne.de/kfc/deko.htm) (letzter Zugriff: 25.04.2000).
- Dekompression. [Home.t-online.de/mfalldorf/mediz03.htm](http://Home.t-online.de/mfalldorf/mediz03.htm) (letzter Zugriff: 18.04.2000).
- Fasten hungern verhungern. [amor.rz.hu-berlin.de/~h0444wkz/fasten.htm](http://amor.rz.hu-berlin.de/~h0444wkz/fasten.htm) (letzter Zugriff: 27.02.2002).
- Frölich, J.C. Lipobay. [wysiwyg://42http://www.yavivo.de/Arzneim...toffwechsel/Fettstoffwechsel/Lipobay.html](http://wysiwyg://42http://www.yavivo.de/Arzneim...toffwechsel/Fettstoffwechsel/Lipobay.html) (letzter Zugriff: 27.09.2001).
- HBO-Informationen für Patienten. [www.hbo.de/patinfo.htm](http://www.hbo.de/patinfo.htm) (letzter Zugriff: 24.03.2000).
- Hoffmann, G. Tauchmedizin. [www.netcologne.de/kfc/awmf.htm](http://www.netcologne.de/kfc/awmf.htm) (letzter Zugriff: 20.06.2003).
- Hyperventilation. [www.hyperventilation.html](http://www.hyperventilation.html) (letzter Zugriff: 20.06.2003).
- Informationen zu Lipobay®. [www.zeiss-apotheke.de/Lipobay.htm](http://www.zeiss-apotheke.de/Lipobay.htm) (letzter Zugriff: 20.06.2003).
- Mertens, P. Eiweißmangel im Alter birgt ungeahnte Risiken. [www.statt-zeitung.de/medizinheute/diet/focus/Eiweissmangel/eiweissmangel.html](http://www.statt-zeitung.de/medizinheute/diet/focus/Eiweissmangel/eiweissmangel.html) (letzter Zugriff: 23.06.2003).
- Muggenthaler, K-H. Dekompressionskrankheit. [www.anr.de/anr\\_online/richtlinien/dekomp.html](http://www.anr.de/anr_online/richtlinien/dekomp.html) (letzter Zugriff: 25.04.2000).
- Multilevel 1.6. Dekompression in Theorie und Praxis. [cave.lawo.de/jbohnert/multilevel/dekompression.htm](http://cave.lawo.de/jbohnert/multilevel/dekompression.htm) (letzter Zugriff: 23.06.2003).
- Rachow, P. (1999). Tieftauchen – Pro und Contra (Teil I). [http://de\\_tieft.html](http://de_tieft.html) (letzter Zugriff: 22.04.2000).
- Xenical-Was ist dran an der "Fett-weg-Pille"? (1998). <http://www.hrz.uni-giessen.de/nutriinfo/xenical.htm> (letzter Zugriff: 27.03.2001).

## **Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Göttingen, den