

DIE WIRKUNG VON ANIMATION UND SIMULATION AUF DAS VERSTÄNDNIS VON STOFFWECHSELPHYSIOLOGISCHEN PROZESSEN

Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von Claudia Nerdel
in Kiel im Dezember 2002

Referent/in:.....
Korreferent/in:.....
Tag der mündlichen Prüfung:.....
Zum Druck genehmigt: Kiel,

Der Dekan

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	1
ABSTRACT.....	2
I EINLEITUNG	3
II THEORETISCHER HINTERGRUND.....	6
1 MODELLVORSTELLUNGEN ZUM LERNEN MIT MULTIMEDIA	7
1.1 Stehende Bilder und Animationen	9
1.2 Interaktive Animationen (Simulationen)	9
1.3 Instruktionale Hilfestellungen beim Lernen mit Simulationen	10
2 BEEINFLUSSUNG DES LERNENS DURCH INDIVIDUELLE LERNERMERKMALE	12
2.1 Themenspezifisches Vorwissen.....	13
2.2 Individuelle Lernpräferenz.....	14
2.3 Kognitive Belastung	15
3 ZUSAMMENFASSUNG	16
4 RELEVANZ DER BISHERIGEN BEFUNDE FÜR DIE BIOLOGIEDIDAKTISCHE FORSCHUNG	16
III FORSCHUNGSANSATZ	19
1 FRAGESTELLUNG DER ARBEIT.....	19
2 FORSCHUNGSHYPOTHESEN ZUR WIRKUNG DES COMPUTEREINSATZES	20
2.1 Hypothesen zur Wirksamkeit von stehenden Bildern und Animationen	20
2.2 Hypothese zur Wirksamkeit von Animationen und Simulationen	21
2.3 Hypothesen zur Wirksamkeit von Simulationen und ihren instruktionalen Hilfestellungen ..	22

IV METHODEN.....23

1 KONZEPT UND ANLAGE DER GESAMTSTUDIE 23

2 MATERIAL..... 25

2.1 Die Lernumgebungen der Studien 25

2.2 Die Erhebungsinstrumente..... 27

2.2.1 Vortest 28

2.2.2 Nachtest 30

2.2.3 Follow-up-Test 31

3 ERHEBUNGSMETHODE 32

3.1 Die Versuchspersonen..... 33

3.2 Die Experimentalgruppen..... 33

3.3 Ablauf der computergestützten Lernsitzen 35

4 AUSWERTUNGSMETHODEN..... 37

4.1 Deskriptive Statistik und inferenzstatistische Methoden 37

4.1.1 Unabhängige Variablen..... 38

4.1.2 Abhängige Variablen..... 39

4.1.3 Inferenzstatistik 40

4.1.4 Auswertungsschema zur Überprüfung der Forschungshypothesen..... 42

4.2 Probabilistische Testmodelle 44

4.2.1 Klassifizierende Testauswertung: Latente Klassenanalyse (LCA) 44

4.2.2 Die Modellgleichung..... 45

4.2.3 Modellgeltung 47

4.2.4 Zuordnungswahrscheinlichkeiten..... 48

4.2.5 Veränderungsmessungen mit LCA..... 49

V STUDIE 1 (BIOMEMBRANEN)..... 54

1 STRUKTUR UND FUNKTION BIOLOGISCHER MEMBRANEN AUS

FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE..... 55

1.1 Aufbau biologischer Membranen 55

1.2 Transportvorgänge..... 56

1.2.1 Diffusion 57

1.2.2 Passiver Transport 57

1.2.3 Aktiver Transport..... 57

1.2.4 Beispiel für das Zusammenspiel verschiedener Transportarten: Glucosetransport im Darm 58

2	STRUKTUR UND FUNKTION BIOLOGISCHER MEMBRANEN AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE	59
3	MATERIAL UND METHODE	60
3.1	Die Lernumgebung der Studie 1 (Biomembranen)	60
3.2	Stichprobe und Experimentalgruppe	62
3.3	Die Erhebungsinstrumente	62
3.3.1	Vortest	62
3.3.2	Nachtest	65
4	ERGEBNISSE	68
4.1	Die Wirkung der Lernumgebung auf Faktenwissen und Verständnis der Vorgänge an Biomembranen	68
4.1.1	Häufigkeiten der Summenscores in Kategorien Faktenwissen und Verständnis	68
4.1.2	Häufigkeiten der Lernzuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis	70
4.1.3	Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachtestergebnisse und die Lernzuwächse	72
4.1.4	Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest	74
4.2	Der Einfluss des Vorwissens auf den Lernerfolg	75
4.2.1	Definition des Lernermerkmals „Vorwissen“	75
4.2.2	Korrelationen zwischen Faktenwissen und Verständnis	76
4.2.3	Clusteranalyse zur Einteilung der Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau	77
4.2.4	Gruppenvergleich (t-Test)	77
4.3	Der Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernerfolg	78
4.3.1	Clusteranalyse zur Einteilung von Verbalisierern und Visualisierern	78
4.3.2	Ergebnisse des Gruppenvergleichs (t-Test)	79
4.4	Kognitive Belastung	80
5	DISKUSSION	81
5.1	Allgemeine Statistik	81
5.2	Vorwissen	82
5.3	Lernpräferenz	82
5.4	Kognitive Belastung	83
5.5	Zusammenfassung	84

VI STUDIE 2 (ATMUNGSKETTE)..... 85

1	DIE ATMUNGSKETTE AUS FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE	85
1.1	Aufbau der inneren Mitochondrienmembran.....	86
1.2	Die Atmungskette.....	87
1.2.1	Kopplung von Elektronen- und Protonentransport.....	87
1.2.2	Die ATP-Synthese.....	89
1.2.3	Einspeisung von Elektronen über FADH ₂	90
2	DIE ATMUNGSKETTE AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE.....	90
3	MATERIAL UND METHODE	92
3.1	Lernumgebungen der Studie 2	92
3.1.1	Vergleichende Übersicht für die Lernumgebungen in Studie 2	93
3.1.2	Lernumgebung 1: Standbild	94
3.1.3	Lernumgebung 2: Animation	97
3.1.4	Lernumgebung 3: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	97
3.1.5	Lernumgebung 4: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	103
3.2	Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen	104
3.3	Die Erhebungsinstrumente.....	105
3.3.1	Vortest.....	105
3.3.2	Nachtest	106
3.3.3	Diskussion der Kennwerte der Erhebungsinstrumente.....	106
4	ERGEBNISSE.....	107
4.1	Deskriptive Statistik.....	107
4.1.1	Häufigkeiten der Summenscores in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis	107
4.1.2	Häufigkeiten der Zuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis	109
4.1.3	Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachtestergebnisse und ihre Differenzwerte	110
4.1.4	Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest.....	112
4.2	Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen.....	113
4.2.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	113
4.2.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	121
4.2.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	124
4.3	Analysen mit probabilistischen Testmodellen	128
4.3.1	Vorbemerkungen zur probabilistischen Testauswertung.....	129
4.3.2	Modellgeltung.....	130
4.3.3	Auswahl eines Testmodells.....	130

4.3.4	Zuordnungswahrscheinlichkeiten beim klassifizierenden Modell mit drei latenten Klassen (LCA3).....	131
4.3.5	Itemprofile der latenten Klassen der LCA3	132
4.3.6	Analyse des Lernerfolgs der Gesamtstichprobe.....	134
4.4	Klassifizierende Testmodelle zur Überprüfung der Forschungshypothesen	140
4.4.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	140
4.4.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	141
4.4.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	142
4.5	Zusammenfassung.....	143
5	DISKUSSION.....	146
5.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	147
5.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	151
5.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	152
5.4	Vorwissen und Lernerfolg	156
5.5	Schlussfolgerungen für die Studie 3	158
VII	STUDIE 3 PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHE.....	159
1	DIE PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHE AUS FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE	159
1.1	Bau und Funktion der Thylakoidmembran.....	160
1.2	Die Primärreaktionen der Fotosynthese im Detail	162
1.2.1	Nichtzyklischer Elektronentransport.....	162
1.2.2	Zyklischer Elektronentransport	163
1.2.3	ATP-Synthese	163
2	DIE PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHE AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE	163
3	MATERIAL UND METHODE	165
3.1	Lernumgebungen der Studie 3	165
3.1.1	Vergleichende Übersicht für die Lernumgebungen in der Studie 3.....	166
3.1.2	Lernumgebung 1 und Lernumgebung 2: Standbild und Animation	167
3.1.3	Lernumgebung 3: Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen.....	171
3.1.4	Lernumgebung 4: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	174
3.1.5	Lernumgebung 5: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	175
3.2	Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen	178
3.3	Die Erhebungsinstrumente.....	179

3.3.1	Vortest.....	179
3.3.2	Nachtest.....	180
3.3.3	Diskussion der Kennwerte der Erhebungsinstrumente.....	180
4	ERGEBNISSE.....	181
4.1	Deskriptive Statistik.....	181
4.1.1	Häufigkeiten der Summenscores in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis	181
4.1.2	Häufigkeiten der Zuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis	183
4.1.3	Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachtestergebnisse und ihre Differenzwerte	184
4.1.4	Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest.....	186
4.2	Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen.....	187
4.2.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	187
4.2.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	196
4.2.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	198
4.3	Analysen mit probabilistischen Testmodellen	206
4.3.1	Vorbemerkungen zur probabilistischen Testauswertung.....	207
4.3.2	Modellgeltung	207
4.3.3	Auswahl eines Testmodells.....	207
4.3.4	Zuordnungswahrscheinlichkeiten beim klassifizierenden Testmodell mit drei latenten Klassen (LCA3).....	208
4.3.5	Itemprofile der latenten Klassen der LCA3	209
4.3.6	Analyse des Lernerfolgs der Gesamtstichprobe	211
4.4	Klassifizierende Testmodelle zur Überprüfung der Forschungshypothesen	216
4.4.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	216
4.4.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	217
4.4.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	218
4.5	Zusammenfassung.....	219
5	DISKUSSION.....	223
5.1	Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern.....	223
5.2	Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung.....	227
5.3	Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen.....	228
5.4	Vorwissen und Lernerfolg	231

VIII	VERGLEICH DER STUDIEN 2 & 3.....	234
1	ZUSAMMENFASSUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	235
2	VERGLEICHENDE DISKUSSION DER BEFUNDE	236
2.1	Wirksamkeit stehender Bilder und Animation	236
2.2	Wirksamkeit von Animation und Simulation.....	242
2.3	Wirksamkeit von Simulation und instruktionaler Hilfestellung.....	243
3	AUSBLICK.....	246
IX	ANHANG	248
1	LITERATUR	248
2	TABELLENVERZEICHNIS	252
3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	258
4	SOFTWARE	262
4.1	Verzeichnis der Software und ihre technischen Details.....	262
4.1.1	Studie 1 (Biomembranen)	262
4.1.2	Studie 2 (Atmungskette).....	262
4.1.3	Studie 3 (Fotosynthese).....	263
4.2	Beispiele für Lehrtexte aus der Lernsoftware	265
4.2.1	Studie 2 (Atmungskette): Standbild und Animation	265
4.2.2	Studie 3 (Fotosynthese): Standbild und Animation.....	270
5	INSTRUKTIONALE HILFSTELLUNGEN	276
5.1	Studie 1 (Biomembranen)	276
5.2	Studie 2 (Atmungskette).....	276
5.3	Studie 3 (Fotosynthese).....	276
6	FRAGEBÖGEN	277
6.1	Biomembranen Vortest: Computerkenntnisse, Lernpräferenz.....	277
6.2	Studie 1 (Biomembranen) Nachtest: Kognitive Belastung, Motivation	278
6.3	Wissenstest zu Studie 1 (Biomembranen).....	279

6.4	Studie 2 (Atmungskette) Vortest: Computerkenntnisse, Lernpräferenz	282
6.5	Studie 2 (Atmungskette) Nachtest: Kognitive Belastung, Motivation.....	283
6.6	Wissenstest zur Studie 2 (Atmungskette).....	284
6.7	Studie 3 (Fotosynthese) Vortest: Computerkenntnisse, Lernpräferenz.....	287
6.8	Studie 3 (Fotosynthese) Nachtest: Kognitive Belastung, Motivation	288
6.9	Wissenstest zu Studie 3 (Fotosynthese).....	289
7	WEITERE ERGEBNISSE	292
7.1	Studie 2 (Atmungskette).....	292
7.1.1	Fertig geworden?	292
7.1.2	Clusteranalyse zum Vorwissen: Verteilung auf die Treatments	293
7.1.3	Ergebnistabellen zur latenten Klassenanalyse	294
7.2	Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese)	296
7.2.1	Fertig geworden?	296
7.2.2	Clusteranalyse zum Vorwissen: Verteilung auf die Treatments	297
7.2.3	Ergebnistabellen zur latenten Klassenanalyse	298
7.2.4	Zuordnungswahrscheinlichkeiten der „Lerner“.....	302
8	ANMERKUNGEN.....	303

ZUSAMMENFASSUNG

Die Neuen Medien bieten die Möglichkeit, dynamische Prozesse mithilfe von computerbasierten Animationen zu veranschaulichen. Des Weiteren laden computergestützte Simulationen Lernende ein, Kausalbezüge innerhalb eines komplexen Systems aktiv und selbstgesteuert zu untersuchen. Der theoretische Hintergrund dieser Untersuchung basiert auf Ergebnissen der empirischen Forschung und den daraus resultierenden kognitionspsychologischen Modellen im Bereich des computergestützten Lernens.

In dieser Studie wird die Wirksamkeit von computergestützter Animation und Simulation auf das Verständnis komplexer biologischer Prozesse untersucht. Die biologische Membran mit ihren dynamischen Eigenschaften wurde als grundlegendes Konzept für den computergestützten Unterricht gewählt, da sie eine große Bedeutung für eine Vielzahl von biologischen Phänomenen hat. Die durchgeführte empirische Untersuchung besteht aus vier einzelnen Studien, die jeweils ein eigenes Thema aus der Stoffwechsel- und Neurophysiologie behandeln. Der hauptsächliche Focus der empirischen Untersuchung lag dabei auf der Wechselwirkung zwischen den individuellen Lernermerkmalen (themenspezifisches Vorwissen, verbale bzw. visuelle Lernpräferenz, kognitive Belastung) und den verschiedenen computergestützten Lernumgebungen. Ein weiteres Augenmerk galt der Wirksamkeit instruktionaler Hilfestellungen beim Lernen mit Simulationen gelegt. Schülerinnen und Schülern der 11. Jahrgangsstufe der gymnasialen Oberstufe wurden im Rahmen einer Studie in unterschiedlichen Experimentalgruppen (stehende Bilder, Animationen, Simulationen und Simulationen mit Instruktionen) zum Thema Biomembranen computergestützt unterrichtet. In einem Vortest wurden die verbale und visuelle Lernpräferenz sowie das themenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen erhoben. Nach einer computergestützten Lernsitzung wurde abermals das themenspezifische Wissen differenziert nach Faktenwissen und Verständnis in einem Nachtest überprüft. Dieser erfragte ferner die subjektive Einschätzung der kognitiven Belastung der Versuchspersonen während der Lernsitzung.

Im Gegensatz zu den Hypothesen dieser Untersuchung zeigten sowohl die varianzanalytischen als auch die probabilistischen Verfahren bei der Datenauswertung, dass das Vorwissen deutlicher die Qualität des Lernerfolgs beeinflusst als die unterschiedlichen Lernumgebungen. Des Weiteren waren keine einheitlichen Wechselwirkungsmuster zwischen den individuellen Lernermerkmalen (Vorwissen, Lernpräferenz) und den computergestützten Lernumgebung festzustellen. Die kognitive Belastung hatte stets einen negativen Einfluss auf den Lernerfolg. Diese Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit ausführlich dargestellt, analysiert und zwischen den verschiedenen Studien verglichen.

ABSTRACT

Modern educational technology offers the opportunity to visualize dynamic processes with the help of computer-based animations. Furthermore, computer-based simulations invite learners to investigate actively causal relations within complex systems. The theoretical background derives from cognitive psychological models and research work within the field of computer-based learning.

In this study the effects of computer-based animations and simulations on the understanding of complex biological processes were examined. The dynamic features of the biomembrane were chosen as a basic concept for instruction because of its importance for a variety of biological phenomena. The presented study consists of four parts. Metabolism and neuroscience are the topics these four studies deal with. The major focus was on the interrelations of learners' prior knowledge, their visual and verbal learning preferences, cognitive load, and the computer based learning environment. Specific attention was directed to the importance of instructional aids aiming to support learning with simulations. 11th-graders of German Secondary Schools were instructed in the topic of biomembranes in groups working with different kinds of computer-based learning environments. These consist of animations or simulations (interactive animations with parameter choice) either with or without special instructional aids. In a pretest individual visual and verbal learning preferences as well as subjects' domain specific biological knowledge were examined. Subsequent to the treatment factual knowledge and comprehension was examined again and individual cognitive load was registered.

Contradicting the hypotheses of the study, quantitative and qualitative data analysis revealed that prior knowledge was far more important for the quality of learning success than the influence of the different learning environments. Furthermore, no consistent interaction patterns between prior knowledge or visual/verbal learning preferences and the learning environment could be found. Additionally, a high individual cognitive load had a bad influence on learning results. In this theses these results will be discussed, considering the interactions of treatment and learner features between the different studies.

I EINLEITUNG

Der Erwerb von anwendbarem und anschlussfähigem Wissen ist ein grundsätzliches Problem im deutschen naturwissenschaftlichen Unterricht (Baumert & Bos, 1998; Baumert et al., 2001). Gerade bei der Vermittlung von komplizierten Sachverhalten können viele Schülerinnen und Schüler nicht das notwendige konzeptuelle Verständnis erwerben. In diesem Zusammenhang werden vielfach hohe Erwartungen an den Einsatz der neuen Medien im Unterricht geknüpft. Daher wird unter anderem auch in zunehmendem Maße in der Lehr-Lernforschung die Wirkung des Einsatzes moderner Informations- und Kommunikationstechnologien im Unterricht auf das Verständnis und den Aufbau von anwendbarem Wissen bei den Lernenden untersucht. Den Fokus des Interesses bilden bei kognitionspsychologisch orientierten Studien die multimedialen Gestaltungsweisen wie Animation und Simulation mit interaktiven Elementen für den Benutzer. Es wird erwartet, dass der Einsatz dieser Technologien im Schulunterricht hilft, bei den Schülerinnen und Schülern ein adäquates mentales Modell dieser dynamischen Systeme aufzubauen. Empirische Befunde in der Multimedia-Forschung legen die Vermutung nahe, dass insbesondere Personen mit geringem themenspezifischen Vorwissen von animierten Darstellungen in computergestützten Lernumgebungen für das Verständnis von Prozessen profitieren könnten (Lewalter, 1997; Mayer, 1997; Rieber & Kini, 1991). Des Weiteren lassen empirische Befunde darauf schließen, dass multimediale Lernumgebungen lernförderlich für Personen mit visueller Lernpräferenz sind im Gegensatz zu denen mit verbaler Präferenz, die von den bildlichen Darstellungen nur wenig profitieren (Plass et al., 1998).

Bei computergestützten interaktiven Animationen, die im Folgenden als Simulationen bezeichnet werden, ist der Lernende aufgefordert, sich selbsttätig mit dem dargestellten System auseinander zusetzen, um sich die Kausalzusammenhänge eines Lerninhalts auf diese Weise aktiv zu erschließen. Diese Form der Selbststeuerung soll im Gegensatz zum passiven Rezipieren bei einfachen Animationen einen positiven Einfluss auf die Motivation des Lernenden haben und darüber hinaus das Verständnis besonders fördern (Euler, 1994; Haack, 1995; Schnotz, et al., 1999). Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, dass Simulationen die Schülerinnen und Schüler hier zumeist nicht nur mit einem unbekanntem Lerninhalt, sondern auch mit den unterschiedlichen Abläufen und Zuständen des Systems konfrontiert werden, über das erst strukturiertes Wissen erworben werden soll. Auf diese Weise können Simulationen eine starke kognitive Belastung bei den Lernenden hervorrufen (de Jong & Njoo, 1992; Schnotz et al., 1999). Es wird vermutet, dass Lernende mit geringem Vorwissen überdurchschnittlich stark von dieser Beeinträchtigung betroffen sind. Um gerade diese Lernenden vor einer kognitiven Überlastung beim Arbeiten mit Simulationen zu

bewahren, sollten sie durch spezielle instruktionale Hilfestellungen unterstützt werden (Leutner, 1993).

Kritisiert wurde jedoch häufig an den empirischen Befunden der Multimedia-Forschung, dass die behandelten Wissensdomänen zu stark eingegrenzt waren. Die Lerninhalte wurden häufig auf der Faktenwissensebene abgehandelt, während die dahinter stehenden Konzepte unreflektiert blieben. Infolgedessen wurde in diesem Zusammenhang auch beanstandet, dass die aus den Resultaten gezogenen Schlussfolgerungen zu weitreichend gewesen seien. Daher müsse sich erst noch zeigen, ob diese Annahmen im Hinblick auf den naturwissenschaftlichen Unterricht des schulischen Kontextes generalisiert werden können.

Insbesondere für den Biologieunterricht mangelt es an empirischen Untersuchungen zur Wirkung computergestützter Lernumgebungen auf das Lernen komplexer biologischer Konzepte. Diese Studie hatte damit zum Ziel, die Wirkungsweise von Animation und Simulation auf das Verständnis von Konzepten komplexer biologischer Prozesse zu analysieren. Als Beispiel wurde die biologische Membran mit ihren unterschiedlichen Strukturen und Funktionsweisen ausgewählt. Die Biomembran wurde dabei in mehreren biologischen Themenbereichen behandelt. Damit wurde Wissen über die Biomembran bei ansteigender Komplexität der Unterrichtsinhalte kumulativ vermittelt. Das Thema „Biomembranen“ verbindet ferner grundlegende Prinzipien und Reaktionen des anabolen und katabolen Stoffwechsels miteinander, wobei dem tieferen Verständnis eine Einsicht in die dynamischen Eigenschaften und die zugrundeliegenden kausalen Bezüge vorausgehen muss. Das Konzept der biologischen Membran findet daher vielfältige Anwendung im Biologieunterricht der gymnasialen Oberstufe.

Die empirische Untersuchung, die aus vier einzelnen Studien besteht, wurde in der 11. Jahrgangsstufe an schleswig-holsteinischen Gymnasien und Gesamtschulen durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler erhielten dazu unterschiedliche Versionen von computergestützten Lernumgebungen, wobei sich drei Typen grob unterscheiden lassen: Lernumgebungen mit stehenden Bildern (Standbildversionen), Lernumgebungen mit animierten Darstellungen (Animationen) und Lernumgebungen mit interaktiven Animationen (Simulationen). Von den Simulationen werden verschiedene Varianten auf ihre Lernwirksamkeit hin überprüft, die sich bei gleichem Lerninhalt in der Art ihrer instrukionalen Unterstützung unterscheiden. Hauptsächlicher Fokus dieser empirischen Untersuchung mit ihren vier Studien ist daher, die Lernwirksamkeit der verschiedenen computergestützten Lernumgebungen im Hinblick auf das Verständnis zu überprüfen und dabei insbesondere ihre Beziehungen und Wechselwirkungen mit den individuellen Lernermerkmalen und Lernvoraussetzungen wie themenspezifisches Vorwissen, Lernpräferenz und kognitive Belastung zu analysieren. Ein weiterer Schwerpunkt bei der Auswertung ist dabei der

Effektivität der unterschiedlich gestalteten instruktionalen Hilfestellungen beim Lernen mit Simulationen gewidmet.

Im empirischen Teil der vorliegenden Arbeit werden die ersten drei der durchgeführten vier Studien mit ihren Datenauswertungen und Ergebnissen vorgestellt und diskutiert. Bei der Auswertung der empirischen Studien wurden zwei verschiedene Verfahren verwendet. Während der erste Teil der Datenauswertung mit varianzanalytischen Verfahren auf der Basis klassischer Testtheorie durchgeführt wurde, kamen im zweiten Teil der Datenanalyse probabilistische Testmodelle zum Einsatz. Die beiden Verfahren wurden als komplementäre Ansätze zur Analyse des Lernerfolgs in den Experimentalgruppen genutzt. Die varianzanalytischen Verfahren quantifizieren und vergleichen die mittleren Lernerfolge unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit den Einflussgrößen Vorwissen und Lernpräferenz miteinander. Die probabilistischen Testmodelle erlauben hingegen differenzierte qualitative Aussagen hinsichtlich des themenspezifischen Vorwissens und des Lernerfolgs.

Die abschließende Diskussion der Arbeit widmet sich dann zusammenfassend den verschiedenen Effekten, die für die drei Studien untereinander verglichen werden. In der Gesamtschau wird noch einmal darauf eingegangen, ob die sogenannten „Neuen Medien“ in der Lage sind, das Verständnis von komplexen biologischen Prozessen zu beeinflussen. In diesem Zusammenhang wird erörtert, ob die Erwartungen an instruktionale Hilfestellungen unter Berücksichtigung der individuellen Voraussetzungen der Person des Lernenden erfüllt worden sind. Hierzu werden abschließend einige Überlegungen vorgetragen, wie durch künftige Forschungsarbeiten im Bereich computerbasierter Animation und Simulation einen Beitrag dazu geleistet werden könnte, instruktionale Unterstützung für konstruktives Lernen mit Multimedia in Abstimmung mit den individuellen Voraussetzungen des Lernenden optimal zu gestalten.

II THEORETISCHER HINTERGRUND

Computer werden wie andere Medien im Unterricht eingesetzt, weil man sich mit ihnen erfolgreicher lernen verspricht. So wird erwartet, dass sich naturwissenschaftliche Sachverhalte mithilfe von Animationen, d. h. bewegten Bildern, besser veranschaulichen lassen als etwa durch stehende Bilder. Interaktive Manipulationen in computergestützten Lernumgebungen, wie z. B. das Einstellen von Parametern in einer Simulation, erlauben den Lernenden ein hohes Maß an aktivem und konstruktivem Lernverhalten. Die selbstbestimmte Auswahl und Sequenzierung von Inhalten räumt den Lernenden größere Freiräume ein als festgelegte Lerninhalte mit vorgegebener Reihenfolge und können so zu individuell stärker abgestimmten Lernprozessen führen.

Bei aller Euphorie, mit der die neuen Medien in das Unterrichtsgeschehen eingezogen sind, werden nun Stimmen laut, die zu dem Schluss kommen, dass es nicht möglich ist, allgemeingültige Aussagen über eine spezifische Lernwirkung von Multimedia-Anwendungen zu machen (Hasebrook, 1995a). Vielmehr müssten weitere Einflussfaktoren beim Lernen mit Multimedia stärker berücksichtigt werden. Explizit wird in diesem Zusammenhang auf die folgenden Faktoren hingewiesen:

- Differenzierung der *Lernleistung* nach Faktenwissen, Transferleistung und Problemlösefähigkeit,
- *Lehrmethode* (Welche Art der medialen Gestaltung wird gewählt? Welche instruktionalen Hilfestellungen werden den Lernenden gegeben?)
- Einflussvariablen, die von der *Person des Lernenden* ausgehen (z. B. sein Vorwissen und seine individuellen Präferenzen für textlich oder bildlich dargebotenes Material beim Lernen).

In diesem Kapitel wird daher der theoretische Hintergrund zum Lernen mit multimedialen Lernumgebungen dargestellt, der besonders die eben genannten Einflussfaktoren berücksichtigt und die Bedingungen für eine positive Wirkung des Multimedia-Lernens beleuchtet. Dazu werden im ersten Abschnitt eingangs Modellvorstellungen zum Lernen mit Multimedia behandelt. Die folgenden Unterabschnitte widmen sich dann den empirischen Studien, die auf der Basis dieser Modellvorstellungen durchgeführt worden sind. Im zweiten Abschnitt werden ferner wichtige Einflussvariablen für den Lernerfolg auf der Ebene des Individuums vorgestellt. Dabei sind gerade diejenigen empirischen Befunde von besonderem Interesse, die als einen ihrer Schwerpunkte den erfolgreichen Wissenserwerb beim Lernen mit Multimedia in Abhängigkeit von den individuellen Lernpräferenzen untersucht haben.

1 MODELLVORSTELLUNGEN ZUM LERNEN MIT MULTIMEDIA

Die Wirkung bildlicher Darstellungen auf den Wissenserwerb wird zur Zeit unter anderem durch die Theorie der dualen Codierung von Paivio beschrieben (Clark & Paivio, 1991; Paivio, 1978). Nach dieser Theorie existieren zwei unterschiedliche kognitive Systeme zur Informationsverarbeitung im Arbeitsgedächtnis. Der eine Teil, das verbale System, rezipiert und verarbeitet verbale und sequenziell strukturierte Informationen, wie sie in geschriebenem oder gesprochenem Text enthalten sind. Der andere Teil, das nicht-verbale oder visuelle System, ist dagegen für die Aufnahme und Verarbeitung von räumlicher und synchron dargebotener Information zuständig, wie sie für bildhaftes Material charakteristisch ist. Die resultierende mentale Repräsentation ist räumlich-analog aufgebaut. In ihr sind Form, Position und vektorielle Beziehungen zu anderen Gegenständen in der zweidimensionalen Ebene oder dem dreidimensionalen Raum abgebildet (Paivio, 1986). Beim Lernen ist nun die Verknüpfung der beiden Repräsentationsformen nach Paivio von essentieller Bedeutung, da auf diese Weise ein Wissensgegenstand doppelt kodiert und somit auch besser im Gedächtnis verankert wird. Als Folge davon wird das doppelt codierte Wissen leichter – sowohl verbal als auch visuell – wieder abrufbar.

Die *Kognitive Theorie des Multimedia-Lernens* von Mayer (Mayer, 1997; Mayer, 2001; Mayer & Anderson, 1991) kann als Anwendung der dualen Kodierungstheorie von Paivio auf das computergestützte Lernen und gleichzeitig als deren Erweiterung verstanden werden. Abbildung II-1 zeigt hierzu eine schematische Darstellung. Dabei geht Mayer wie Paivio von zwei kognitiven Systemen aus, unterteilt aber den Prozess der Einspeicherung ins Gedächtnis in zwei zeitlich aufeinanderfolgende Abschnitte.

1. Die oberflächlichen Merkmale von textlicher und bildlicher Information werden vom Lernenden registriert und in das sensorische Gedächtnis aufgenommen. Anschließend werden Texte als *symbolische Oberflächenrepräsentation* ins Arbeitsgedächtnis aufgenommen. Der Lernende erfasst dabei die oberflächliche Kohäsion eines Textes und prägt sich im Text enthaltene Begriffe und Aussagen ein (vgl. Kintsch, 1986). *Bilder* werden entsprechend in dieser Phase als *analoge Oberflächenrepräsentation* ins Arbeitsgedächtnis aufgenommen. Analog zur textbezogenen Repräsentation beschränkt sie sich damit auf die Wahrnehmung von Bildelementen und ihre räumliche Anordnung zueinander. Resultat dieser *Selektion* der verbalen und visuellen Information ist also eine Text- bzw. Bildbasis im Arbeitsgedächtnis. Damit ist aber noch kein weitergehendes Verständnis der in einem Text bzw. Bild enthaltenen Information gegeben.

2. In einem zweiten Teilschritt werden innerhalb der beiden Teilsysteme die Begriffe und Aussagen semantisch weiterverarbeitet und logisch aufeinander bezogen. Durch diesen von

Mayer als *Organisation* (vgl. hierzu Wittrock, 1974, 1989) bezeichneten Prozess entstehen interne mentale Repräsentationen in Form eines verbal basierten sowie eines visuell basierten mentalen Modells. Diese sind die Basis für ein tieferes Verständnis der aufgenommenen Information. Dadurch ist es einem Lernenden möglich, eigene Schlussfolgerungen zu ziehen oder Bezüge zu Inhalten aus dem Langzeitgedächtnis herzustellen (Mayer, 1997; Mayer, 2001).

Abschließend werden diese internen Repräsentationen bzw. das verbale und das visuelle mentale Modell über referentielle Verbindungen miteinander verknüpft. Dabei stellt der Lerner einerseits einen Bezug zwischen im Text verbal beschriebenen sowie den im Bild visuell dargestellten Elementen her. Genauso werden die im Text verbal erläuterten Kausalbeziehungen zwischen diesen Elementen mit ihrer bildhaften Veranschaulichung verknüpft. Dieser Prozess wird von Mayer als *Integration* bezeichnet. Er unterstützt die Lernenden beim Aufbau eines Verständnisses kausaler Zusammenhänge, indem – auch unter Einbeziehung des Vorwissens – ein tiefergehendes, kohärentes Verständnis eines Lerninhalts auf der Basis eines gemeinsamen mentalen Modells erreicht wird (Mayer, 1984, 2001; Wittrock, 1989).

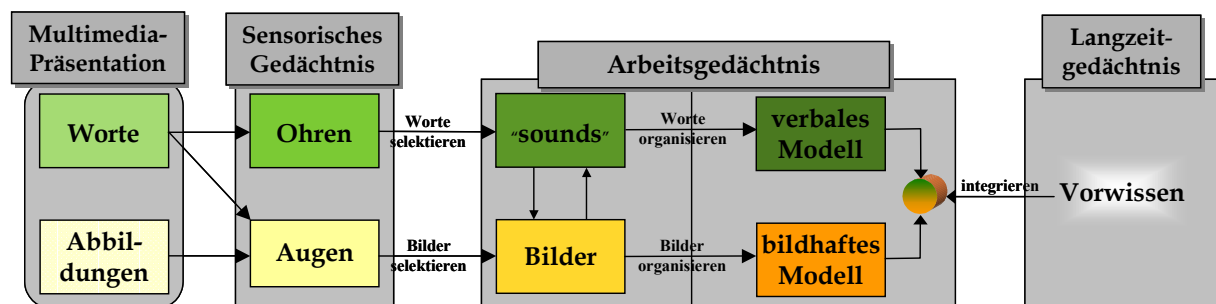


Abbildung II-1: Schematisches Modell zu Mayers *Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens* (verändert nach Mayer, 2001)

Nach Mayers Modellvorstellung ist damit zu erwarten, dass sich eine raum-zeitliche Kopplung von Text- und Bildelementen bei ihrer Präsentation besonders positiv auf das Verständnis ihrer Lerngegenstände auswirkt, da sie den Prozess der Integration unterstützt (Mayer, 1997; Mayer, 2001; Mayer & Anderson, 1991; Moreno & Mayer, 1999). Damit sollte sich diese Art der Darstellung auch prinzipiell in allen naturwissenschaftlichen Domänen ein tieferes Verständnis unterstützen.

1.1 Stehende Bilder und Animationen

Empirische Studien, die auf Mayers *Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens* basieren, zeigen, dass die Kombinationen von stehenden Bildern bzw. Animationen mit zugehörigen Lehrtexten den Erwerb von Verständnis und die Problemlösefähigkeit fördern (Lewalter, 1997; Mayer, 2001; Mayer & Gallini, 1990; Plass et al., 1998). Wie erwartet, sei hierzu allerdings eine räumliche und zeitliche Kontiguität der zusammengehörigen verbalen und visuellen Informationen bei der Präsentation notwendig. Dies bedeute, dass eine textliche Bilderklärung am besten dann verstanden werde, wenn sie zur selben Zeit und in unmittelbarer räumlicher Nähe der piktoralen Information erscheine (Mayer & Anderson, 1991, 1992; Mayer & Sims, 1994). Für das bloße Memorieren von Begriffen und Faktenwissen ist dieses Gestaltungsprinzip nach den zitierten Untersuchungen dagegen unerheblich.

In Mayers *Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens* wird prinzipiell nicht zwischen stehenden Bildern und Animationen im Hinblick auf ihre Wirksamkeit unterschieden. Es wird lediglich angenommen, dass sich Animationen zur Darstellung von Prozessen besser eignen als stehende Bilder (Lewalter, 1997; Mayer, 1997; Schnotz et al., 1998). Die Funktion einer Animation besteht in der realen Darstellung eines Vorganges. Ihre vermuteten Vorteile werden aus dem Supplantationskonzept von (Salomon, 1979) abgeleitet, das besagt, Die externe Präsentation eines zu verstehenden Prozesses entlaste das Arbeitsgedächtnis von der Aufgabe, zunächst eine Vorstellung der Bewegung zu entwickeln. Auf diese Weise würde die Lernaufgabe erleichtert (Park & Hopkins, 1992) und kognitive Kapazitäten für das Verständnis des dargestellten Prozesses sowie für die korrekte Einspeicherung ins Langzeitgedächtnis freigesetzt (Rieber & Kini, 1991). Ferner beugt die externe Präsentation eines Prozesses der Fehlinterpretation einer Bewegung, die durch Pfeile (Bewegungsindikatoren) in einem stehenden Bild symbolisiert wird, vor (Lewalter, 1997).

1.2 Interaktive Animationen (Simulationen)

Ein weiterer Typ animierter Darstellungen sind solche Animationen, die mit einer bestimmten Form von Interaktivität für den Benutzer ausgestattet sind. Für diese Variante wird im Folgenden der Begriff *Simulation* benutzt. Die Interaktivität von Simulationen zeichnet sich dadurch aus, dass der Lernende die Parameter eines Systems manipulieren kann und so den Ablauf und Endzustand des simulierten Vorgangs beeinflusst. Durch diese Art der Beeinflussung hat der Benutzer erheblichen Anteil an der Steuerung und der aktiven

Gestaltung seines Lernprozesses. Der Selbststeuerung werden auch beim computergestützten Lernen besondere motivationale Vorteile und lernförderliche Effekte beigemessen (Euler, 1994; Haack, 1995; Schnotz et al., 1998). Im Gegensatz zu einfachen Animationen, deren Ziel die Visualisierung von Prozessen ist, wird der Simulation auch eine spezielle Wirkung im Hinblick auf das Verständnis und die Ergründung von kausalen Zusammenhängen zugeschrieben, welches gerade durch die aktive Auseinandersetzung mit dem System erreicht wird (Euler, 1994; Haack, 1995; Leutner, 1993; Schnotz et al., 1998). Ob Simulationen diese Erwartungen im Hinblick auf die Verständnisförderung erfüllen, wurde bisher nicht allgemeingültig gezeigt. Diese Vermutung wird daher stets gegenstandsspezifisch zu überprüfen sein.

1.3 Instruktionale Hilfestellungen beim Lernen mit Simulationen

Durch die Einstellbarkeit von Parametern werden die Lernenden durch Simulationen zur Manipulation am dargestellten System aufgefordert. Dadurch erhalten Lernende die Möglichkeit, ihren Lernprozess aktiv zu gestalten und kausale Beziehungen in einem komplexen dynamischen System zu untersuchen. Sowohl diese Freiräume zur Gestaltung des eigenen Lernprozesses als auch die Komplexität der Lernumgebung im Hinblick auf ihren Inhalt und ihre Struktur können aber die Lernenden stark kognitiv belasten. Um die Lerner vor einer kognitiven Überforderung in komplexen Lernumgebungen zu bewahren und um sie ferner im Erwerb von anwendbarem Wissen zu unterstützen, wird in komplexen Kontexten eine ausgeprägte instruktionale Unterstützung angeboten. Diese soll dazu dienen, eine Überlastung der Aufmerksamkeitskapazität durch eine zu komplexe Lernumgebung, wie z. B. durch eine Simulation, zu vermeiden (de Jong & van Joolingen, 1998; Schnotz et al., 1999). Simulationen bieten mehrere Ansatzpunkte für solche instruktionale Unterstützungen. Drei unterschiedliche Typen von instruktionaler Unterstützung werden im Folgenden weiter erläutert.

1. Aufgaben und Lernkontrollfragen

Arbeitsaufträge, Aufgaben und Lernkontrollfragen zu wesentlichen Aspekten des Inhalts dienen der Aufmerksamkeitsfokussierung und der gezielten Informationsbeschaffung (Peeck, 1993, 1994; Rieber, 1990; Weidenmann, 1989). Sie können somit helfen, den Lernprozess zu strukturieren. Die Arbeitsaufträge gliedern sich dabei sinnvollerweise in eine Aufgabenstellung, ein Angebot mehrerer Lösungen, aus denen der Lernende eine Auswahl zu treffen hat, sowie einem Feedback über die Richtigkeit der Auswahl. Aufgaben weisen den Lerner darauf hin, was wesentliche Aspekte des simulierten Systems sind, fungieren

somit als inhaltliche Hilfestellung. Fragen (im Sinne von Lernkontrollfragen) erfüllen eine ähnliche inhaltlich unterstützende Funktion, indem sie im Anschluss an einen Lerninhalt gestellt werden und so den Nutzer auffordern, sein neu erworbenes Wissen zu rekapitulieren oder in einem anderen Kontext anzuwenden (Prechtl & Nerdel, 2002).

Obligatorische Aufgaben und Fragen können ferner an strategisch wichtigen Stellen in die Simulation eingebaut werden, so dass sie von den Benutzern nicht übergangen werden können. Auf diese Weise wird einer zufälligen Sequenzierung der Lerninhalte entgegengewirkt (Prechtl & Nerdel, 2002). Werden Aufgaben dagegen als Option und nicht als verpflichtend zu bearbeiten in eine Simulation eingefügt, so dass auf diese Weise die strikte Benutzerführung entfällt, sollte auf andere Orientierungshilfen, z. B. Checklisten, rekurriert werden.

2. Checklisten

Beim Arbeiten mit einer Simulation legt der Benutzer durch den selbstbestimmten Eingriff in das simulierte System eine Reihenfolge fest, in der die angebotenen Inhalte einer Lernumgebung betrachtet und gelernt werden. Der Nutzer erhält dadurch die Möglichkeit zur selbstbestimmten Sequenzierung seines Lernprozesses. Aber gerade die sinnvolle Sequenzierung der Lerninhalte in einer Simulation bereitet oftmals Probleme, da die Simulation den Lernenden nicht nur mit einem unbekanntem Lerninhalt konfrontiert, sondern auch mit den unterschiedlichen Zuständen und Abläufen desjenigen natürlichen Systems, über das erst strukturiertes Wissen erworben werden soll. Konkrete Lernanleitungen in Form eines „didaktischen roten Fadens“ zum Umgang mit einer Simulation haben sich als hilfreich erwiesen (nach Fischer & Mandl, 1990). Solche Vorschläge, z. B. in Form von „Checklisten“ (nach Prechtl & Nerdel, 2002), beziehen sich auf die Reihenfolge, in der die einzelnen Teile einer Simulation bearbeitet werden sollten, oder auf sinnvolle Kombinationen von Parametereinstellungen, die vom Lernenden vorgenommen werden sollten. Derartige strukturierende Maßnahmen schränken zwar den Freiraum für die Lernenden wieder ein, können aber die Komplexität der Lernumgebung auf ein lernförderliches Maß reduzieren. Ihr erwarteter Nutzen liegt in der kognitiven Entlastung der Lernenden, die dadurch mehr kognitive Kapazität für die eigentlichen Lernprozesse frei haben (Prechtl & Nerdel, 2002).

3. Inhaltliche Basisinformationen

Für den Aufbau themenspezifischen Wissens bei der Bearbeitung von Simulationen haben sich nach Leutner (1993) permanent angebotene, vom Lernenden jederzeit abrufbare Basisinformationen zum Thema als hilfreich erwiesen. In der entsprechenden empirischen Studie wurden die in der Simulation implizit enthaltenen Informationen mithilfe eines Informationstextes explizit gemacht, so dass die Lernenden stets den Zugriff auf die zusätzlichen Informationen selbst bestimmen konnten.

Beim Einsatz von Simulationen im Unterricht ist auf die Ausgewogenheit zwischen der Komplexität der Lernumgebung, die durch die Freiräume zur Interaktion mit dem Medium und die aktive Gestaltung des eigenen Lernprozesses bedingt ist, einerseits und der Bereitstellung von instruktionaler Unterstützung andererseits zu achten. Die Kombination aus diesen beiden Aspekten sollte dazu geeignet sein, eine kognitive Überforderung der Lernenden wirksam zu verhindern. Dies gilt vor allem für die Beschäftigung mit komplexen Lerngegenständen. Anhand von komplexen biologischen Inhalten soll daher untersucht werden, welche besondere Bedeutung instruktionale Hilfestellungen in Form von Aufgaben und Lernkontrollfragen, Checklisten und inhaltlichen Basisinformationen für das Lernen mit Simulationen haben. Diese Aspekte werden im Hinblick auf eine eventuell auftretende Wechselwirkung mit dem themenspezifischem Vorwissen (s. 2.1) und der kognitive Überlastung beim Lernen mit Simulationen wieder aufgegriffen (s. 2.3)

2 BEEINFLUSSUNG DES LERNENS DURCH INDIVIDUELLE LERNERMERKMALE

Wie bereits erwähnt, stellen die kognitiven und motivationalen Merkmale des Lernenden Einflussfaktoren dar, die die Qualität des Lernprozesses und damit letztendlich auch den Lernerfolg erheblich beeinflussen. Da in dieser Studie die Wirksamkeit computergestützter Lernumgebungen im Biologieunterricht auf kognitionspsychologischer Ebene untersucht werden soll, wurden in den folgenden Kapiteln hauptsächlich die empirischen Befunde aus Studien zusammengestellt, in denen der Einfluss von kognitiven Faktoren untersucht wurde. Im ersten Abschnitt wird auf die Bedeutsamkeit des Vorwissens beim Lernen mit computergestützten Lernumgebungen eingegangen. Der zweite Abschnitt behandelt den Einfluss der individuellen verbalen oder visuellen Lernpräferenz. Im dritten und letzten Abschnitt werden die bisherigen Forschungsergebnisse vorgestellt, die Aussagen über die Effekte der kognitiven Belastung insbesondere beim Lernen mit Simulationen erlauben.

2.1 Themenspezifisches Vorwissen

Der Einfluss des themenspezifischen Vorwissens beim Lernen mit Animationen

Stehende Bilder und Animationen wirken im allgemeinen bei Personen mit geringem themenspezifischen Vorwissen verständnisfördernd. Personen, die bereits über ein gewisses Maß an inhaltlichen Vorkenntnissen verfügen, sind dagegen in der Lage, auch ohne Illustrationen ein tieferes Verständnis der erläuterten Sachverhalte in einem Lehrtext aufzubauen (Lewalter, 1997; Mayer, 1997; Mayer & Gallini, 1990). Salomon (1974; 1979) konnte in seinen Untersuchungen zeigen, dass das Vorwissen eine entscheidende Rolle für die Notwendigkeit einer realen Darstellung durch eine Animation spielt. Danach ist die vollständige reale Darstellung umso notwendiger, je geringer das themenspezifische Vorwissen ist, um ein tieferes Verständnis für einen dargestellten Prozess zu erzeugen. Das themenspezifische Vorwissen ist damit eine Einflussvariable, die die Lernwirksamkeit von Animationen und stehenden Bildern moderiert. Des Weiteren kann aus den Befunden gefolgert werden, dass Animationen bei individuellen Vorwissensdefiziten kompensatorisch wirksam sein können. Inwiefern Animationen nun besser als stehende Bilder geeignet sind, komplexe biologische Prozesse zu vermitteln, wird in dieser Studie daher anhand von typischen Beispielen des Lehrplans unter besonderer Berücksichtigung des Vorwissens überprüft.

Der Einfluss des themenspezifischen Vorwissens beim Lernen mit Simulationen

Kennzeichnend für das Lernen mit Simulationen ist das aktive selbstgesteuerte Lernen (de Jong & van Joolingen, 1998; Schnotz et al., 1999). In dieser Hinsicht ist eine von Lee und Lee (1991) durchgeführte Studie zum computergestützten Lernen im Chemieunterricht von Interesse, die die Wechselwirkung einer selbstgesteuerten Lernstrategie mit dem Vorwissen beim computergestützten Lernen untersucht. Wurde das Lernprogramm zur Einführung eines Themas genutzt, profitierten Personen mit geringem Vorwissen davon, wenn ihnen eine Sequenzierung der Lerninhalte und die Anzahl der zu bearbeitenden Beispiele vorgegeben wurde. Wurde das Lernprogramm dagegen dazu benutzt, bereits im Unterricht besprochene Inhalte zu wiederholen, erzielten diese Personen bessere Ergebnisse, wenn sie die Lernsequenz und die Anzahl der Beispiele selbst bestimmen konnten. An diesem Ergebnis lässt sich erneut die Bedeutung instruktionaler Hilfestellungen in Form strategischer Unterstützung durch Sequenzierung der Lerninhalte aufzeigen (s. 1.3). Bei Schülerinnen und Schülern, die von vornherein über ein großes domänenspezifisches Vorwissen verfügten, war das Lernergebnis dagegen nicht vom Einsatzzweck (Einführung, Wiederholung) oder

dem Grad der Selbststeuerung abhängig. Daraus kann geschlossen werden, dass das Lernen mit Simulationen und die damit einhergehende Notwendigkeit der instruktionalen Unterstützung entscheidend vom Vorwissen der Lernenden abhängig ist. Wie beim Lernen mit Animationen kann das Vorwissen also auch beim Lernen mit Simulationen den Lernerfolg entscheidend beeinflussen und muss daher in jedem Falle mit erfasst werden.

2.2 Individuelle Lernpräferenz

In Abhängigkeit davon, welche Kodierung (Text, Bild) ein Lerner präferiert, wird in der Literatur von *Verbalisierern* und *Visualisierern* berichtet. Die Unterscheidung der individuellen Lernpräferenz bezieht sich dabei aber nicht auf die von der Präsentationsform angesprochene Sinnesmodalität, sondern vielmehr auf die bevorzugte mentale Repräsentationsweise, die entweder verbal für gehörte und gelesene Texte oder visuell für bildhafte Informationen erfolgt. Exakter wäre daher eine Einteilung in verbale und non-verbale Lernpräferenzen. Plass und Koautoren (1998) konnten auf der Basis von Mayers *Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens* zeigen, dass es sich für das Lesen und das Verständnis eines fremdsprachigen Textes als vorteilhaft erwies, wenn den Lernenden Worterklärungen in ihrer bevorzugten Kodierungsform (Text oder Illustration) als Hilfestellung angeboten wurden. Aus diesem Ergebnis kann eine Differenzierung des Mayerschen Modells hinsichtlich der Lernpräferenz abgeleitet werden. Entsprechend obigem Ergebnis wird vermutet, dass Visualisierer stärker von den illustrierten Darstellungen profitieren werden als Verbalisierer. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass gerade dynamische Illustrationen, also Animationen, mögliche spezifische Defizite von Verbalisierern ausgleichen könnten. Eine Differenzierung hinsichtlich der Lernpräferenz soll daher auch in ausgewählten Experimentalgruppenvergleichen dieser Studie berücksichtigt werden.

2.3 Kognitive Belastung

Die *Kognitive Theorie des Multimedia-Lernens* von Mayer (2001) macht keine Aussage darüber, ob zwei Formen bildlicher Darstellung, z. B. stehende Bilder und Animationen oder Animationen und Simulationen, für einen bestimmten Zweck unterschiedlich effektiv sind. Nach Mayers Modellvorstellung könnte man vielmehr annehmen, dass bildliche Darstellungen mit gleichem Informationsgehalt in gleicher Weise verarbeitet werden und damit zu ein und demselben mentalen Modell führen. Schnotz (1993; 1996) kritisiert dies an Mayers Modell und unterscheidet selbst inhaltsgleiche Visualisierungen nach dem Verhältnis von zu leistendem kognitiven Aufwand und dem daraus gezogenen Nutzen, also der Nutzungseffizienz. Entsprechend müsse man auch annehmen, dass für das Verständnis von kausalen Bezügen innerhalb eines System der Einsatz von Simulationen förderlich sei; denn dieser Form der Lernumgebung wird gerade diese Wirkung zugeschrieben. Hierbei ist jedoch wiederum die Wechselwirkung mit dem Vorwissen zu berücksichtigen. In der entsprechenden empirischen Studie konnten Schnotz und Koautoren (1996) zeigen, dass inhaltsgleiche, jedoch unterschiedliche Visualisierungen eines Sachverhalts vor allem bei Lernenden mit geringem Vorwissen zu verschiedenen visuellen mentalen Modellen führen können. Auf der Basis dieser unterschiedlichen mentalen Modelle konnten themenspezifische Verständnisaufgaben unterschiedlich gut gelöst werden.

Daran anknüpfend untersuchte Schnotz (1998) in einer Studie mit Universitätsstudenten die lernförderliche Wirkung von animierten Bildern in einer Simulation in Bezug auf einen dynamischen Sachverhalt (Zustandekommen von Zeit- und Datumzonen auf der Erde). Dabei zeigte sich einmal mehr eine lernförderliche Wirkung der animierten Darstellung von Vorgängen. Darüber hinaus deuteten die Ergebnisse aber auch darauf hin, dass das Lernen mit einer Simulation, die sich durch die aktive und selbsttätige Auseinandersetzung mit dem System auszeichnet (s. 1.2), von den Lernenden zusätzliche kognitive Kapazitäten erfordert. Dies kann im ungünstigsten Fall zu einer kognitiven Überlastung führen. In der Studie von Schnotz und Mitarbeitern trat dieser Effekt zwar unter der zusätzlichen Einflussgröße des kooperativen Lernens auf. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch im Falle von Einzelunterricht am Computer der lernförderliche Effekt einer Simulation durch eine zu hohe kognitive Belastung zunichte gemacht werden könnte. Schnotz weist in diesem Zusammenhang ebenfalls darauf hin, dass zur Vermeidung von kognitiver Überlastung durch Lerngegenstand und Lernumgebung diese beiden Variablen an das Vorwissensniveau der Lerngruppe angepasst sein sollten (Schnotz et al., 1998).

3 ZUSAMMENFASSUNG

Computerunterstützte Animationen und Simulationen zur Visualisierung von Prozessen bieten vielfältige Möglichkeiten, komplexe Zusammenhänge zu veranschaulichen. Sie sollten also geeignet sein, das Lernen im Bereich der Biologie wirksam zu unterstützen. Die Ergebnisse verschiedener Studien, die auf Mayers *Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens* basieren, deuten darauf hin, dass die Kombination von Lehrtexten mit Bildern oder Animationen das Verständnis und die Problemlösefähigkeit fördern. Ferner hat die Multimedia-Forschung der letzten Jahre deutlich gezeigt, dass das Vorwissen der Lernenden den Lernprozess entscheidend beeinflusst und daher bei Untersuchungen zum computergestützten Lernen mit berücksichtigt werden muss. Als weitere Einflussvariable auf der Personenebene ist die individuelle Lernpräferenz zu nennen, deren moderierender Effekt beim Lernen mit computergestützten Lernumgebungen ebenfalls kontrolliert werden sollte. Bezüglich der bevorzugten mentalen Repräsentationsweise des Lernenden kann vermutet werden, dass Visualisierer von bildhaftem Material stärker profitieren werden als Verbalisierer. Werden Animationen interaktiv gestaltet (Simulationen), so ist zu berücksichtigen, dass diese möglicherweise zu einer kognitiven Überlastung des Lernenden führen. In diesem Fall dürften instruktionale Hilfestellungen in Form von Aufgaben und Lernkontrollfragen und zusätzlich in Form von Checklisten oder inhaltlichen Basisinformationen den Wissenserwerb zu fördern. Hierbei ist allerdings wieder eine Abhängigkeit vom themenspezifischen Vorwissen der Lernenden zu erwarten.

4 RELEVANZ DER BISHERIGEN BEFUNDE FÜR DIE BIOLOGIEDIDAKTISCHE FORSCHUNG

Wie oben bereits einleitend erwähnt, wurde an vielen dieser empirischen Studien zum computergestützten Lernen kritisiert, dass die fachlichen Inhalte der in den Untersuchungen eingesetzten Lernumgebungen nur eine geringe Komplexität aufwiesen (Hasebrook, 1995a). Es stellt sich nun die Frage, ob die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen nicht zu weitreichend sind. Daher sollen die Aussagen über die Wirksamkeit computergestützter Lernumgebungen im Hinblick auf komplexe Lerninhalte, wie sie für den Biologieunterricht charakteristisch sind, überprüft werden. Die Arbeiten von Mayer bezogen sich beispielsweise auf die auf einfachem Niveau erläuterte mechanische Funktionsweise der Luftpumpe und der Autobremse (Mayer, 1997; Mayer & Gallini, 1990), wobei aber im Lernmaterial keine Bezüge zu übergeordneten Konzepten der Physik (Hebelgesetze, Druck in Gasen und Flüssigkeiten) hergestellt wurden.

Gerade in den naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächern wird jedoch das Erlernen von zentralen Konzepten und ihre flexible Anwendung in beliebigen Kontexten als notwendige Voraussetzung für anschlussfähiges Wissen und lebenslanges Lernen angesehen. Biologische Konzepte beschreiben komplexe Systeme, die häufig dynamisch und durch vielfältige Beziehungen zueinander gekennzeichnet sind und ferner physikalische und chemische Aspekte mit einschließen. Das hinter einem Lerninhalt (bzw. Anwendungsfall) stehende Konzept erschließt sich dem Lernenden erst dann, wenn er die Kausalzusammenhänge zwischen den Prozessen eines Systems eingesehen hat.

Unter diesen Aspekten stellt auch die Vermittlung von biochemischen Vorgängen im schulischen Kontext oftmals ein großes Problem dar. Daher wurde für die Studie ein biologisches Konzept aus diesem Bereich gewählt. Stoffwechselphysiologische Prozesse zeichnen sich durch vielseitige Wechselwirkungen und eine starke Vernetzung zwischen den einzelnen Reaktionswegen aus. Erschwerend kommt hinzu, dass für Bau und Funktion der beteiligten Strukturen hochgradig komplexe Modelle angenommen werden müssen, um die einzelnen Reaktionsmechanismen erklären zu können. Der Veranschaulichung solcher Prozesse mit stehenden Bildern, z. B. in Schulbüchern, sind Grenzen gesetzt. Oftmals bleiben die kausalen Bezüge zwischen Struktur und Funktion bei solchen Darstellungen unverstanden. Infolgedessen werden die Kausalzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen auch hier nur wenig oder gar nicht eingesehen.

Das Modell der biologischen Membran kann als komplexes stoffwechselphysiologisches Konzept aufgefasst werden. Kompartimentierung durch biologische Membranen ist ein kennzeichnendes Merkmal für den lebendigen Organismus. Membranen grenzen Zellen nach außen gegen die Umwelt ab und trennen auf subzellulärer Ebene einzelne Reaktionsräume voneinander. Sie regulieren mit ihren spezifischen Anpassungen den kontrollierten Stoff- und Energieaustausch und damit die „biologische“ Kommunikation mit der Umgebung und der einzelnen Kompartimente untereinander. Membranen schaffen damit die Voraussetzungen, die „Leben“ von der kleinsten Struktur- und Funktionseinheit Zelle bis hin zu den höheren Organisationsebenen Gewebe – Organ – Organismus überhaupt erst ermöglichen. Der spezifische Aufbau und die Funktion einer Membran ist abhängig von ihrer Lokalisation und ihren damit einhergehenden Aufgaben in der Zelle. Allen biologischen Membranen liegen aber ähnliche Bauprinzipien zu Grunde. Darüber hinaus erfolgen die an Membranen im Rahmen des Stoff- und Energieaustauschs stattfindenden Transportvorgänge nach grundlegenden physikalisch-chemischen Gesetzen wie den Diffusionsgesetzen, den Gesetzen der Thermodynamik oder der Elektrochemie. Wegen dieser zentralen verbindenden Prinzipien wird diese Thematik im Biologieunterricht der gymnasialen Oberstufe mehrfach aufgegriffen und in variierenden Kontexten vertiefend behandelt. Dabei findet sie sowohl in der Zoologie als auch der Botanik im Rahmen der

Cytologie, der Stoffwechselphysiologie und der Neurophysiologie verschiedene Anwendungen.

Die spezifischen Wirkungen der besonderen medialen Gestaltungsmöglichkeiten computergestützter Lernumgebungen auf das Verständnis komplexer Sachverhalte wurden in dieser Studie für biologische Unterrichtsinhalte untersucht, da erst noch zu zeigen ist, ob die an einfachen Systemen gewonnenen Erkenntnisse zum Lernen mit Animationen und Simulationen für komplexe biologische Inhalte ihre Gültigkeit behalten. Entsprechend den theoretischen Modellvorstellungen von Paivio und Mayer und den weiteren relevanten empirischen Befunden wurde bei der Gestaltung der Lernumgebungen mit stehenden Bildern und Animationen das Kontiguitätsprinzip¹ eingehalten. Zur Vermeidung einer kognitiven Überlastung wurden Simulationen um verschiedene Formen der instruktionalen Hilfestellung ergänzt und in ihrer Wirkung untersucht. Außerdem wurde gezeigt, ob die genannten Gestaltungsweisen und instruktionalen Maßnahmen in ihrer Wirkung durch individuelle Lernermerkmale (Vorwissen, Lernpräferenz) moderiert werden.

III FORSCHUNGSANSATZ

1 FRAGESTELLUNG DER ARBEIT

Die Vorgänge an biologischen Membranen sowie die Konformationsänderungen der Membranproteine stellen komplexe Prozesse dar, die sich mit Hilfe statischer Bilder nur schwer verdeutlichen lassen. Anschaulicher könnten hier computergestützte animierte Darstellungen sein, die den Ablauf der Prozesse langsam und kontinuierlich darstellen. Für den hier ausgewählten Themenkomplex der biologischen Membranen, der auch die Funktion der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran und die dynamischen Vorgänge der Primärreaktionen der Fotosynthese an der Thylakoidmembran im Chloroplasten thematisiert, sollten die Prozesse durch die animierte Darstellung in Kombination mit erläuternden Lehrtexten besonders gut plausibel gemacht werden können und somit den Lernerfolg deutlich verbessern. Es wird angenommen, dass Animationen und auch Simulationen dabei weniger das reine Faktenwissen verbessern. Ihre Wirkung bezieht sich spezifisch auf den Erwerb von Verständnis. Simulationen mit wählbaren Parametern sollten ferner besonders gut dazu geeignet sein, kausale Bezüge in einem biologischen System zu verdeutlichen. Die Lernerfolge sind dabei einerseits vermutlich vom Vorwissen der Lernenden abhängig. Andererseits ist zu erwarten, dass Schülerinnen und Schüler mit visuellen Lernpräferenzen von Animationen eher profitieren als solche mit verbalen Lernpräferenzen. Instruktionale Hilfestellungen sollten sich günstig auf den Erwerb von Verständnis und auf die kognitive Belastung insbesondere bei vorwissensschwächeren Schülerinnen und Schülern beim Lernen mit komplexen interaktiven Simulationen auswirken. Mit der Studie wurde gleichzeitig untersucht, inwieweit die in anderen Disziplinen festgestellten positiven Wirkungen der oben genannten Lernumgebungen für das schulische Unterrichtsfach Biologie repliziert werden können. Hierzu wurde im Einzelnen experimentell geprüft,

- ob sich komplexe biologische Prozesse mit Hilfe von Animationen besser als mit stehenden Bildern vermitteln lassen und ob im Rahmen dieser Annahme Einschränkungen im Hinblick auf die Lernpräferenz und das themenspezifische Vorwissen gemacht werden müssen,
- ob interaktive Animationen, im Folgenden Simulationen genannt, den Wissenserwerb bezüglich kausaler Beziehungen in einem komplexen System besser als reine Animationen fördern,

- ob bestimmte instruktionale Hilfestellungen in der Lage sind, die kognitive Belastung beim Arbeiten mit Simulationen zu reduzieren und infolgedessen speziell den Erwerb von Verständnis bei Personen mit geringem themenspezifischen Vorwissen begünstigen.

2 FORSCHUNGSHYPOTHESEN ZUR WIRKUNG DES COMPUTEREINSATZES

2.1 Hypothesen zur Wirksamkeit von stehenden Bildern und Animationen

Wirksamkeit der beiden Lernumgebungen im Hinblick auf den Lernerfolg

Animationen sind besser als stehende Bilder dazu geeignet, den Lernerfolg im Hinblick auf biologische Prozesse zu fördern. Dabei muss dafür Sorge getragen werden, dass bei der Gestaltung das Prinzip der räumlichen und zeitlichen Kontiguität eingehalten wird, da sich die verständnisfördernde Wirkung von Text-Bild-Einheiten nur so entfalten kann. Dabei müssen sowohl die Strukturen benannt als auch die einzelnen Schritte im dargestellten Prozess erklärt werden. Unter dieser Voraussetzung wird angenommen:

Hypothese 1: Animationen in Kombination mit Texten sind besser als stehende Bilder mit Texten dazu geeignet, den Lernerfolg im Hinblick auf biologische Prozesse zu fördern.

Wirksamkeit der beiden Lernumgebungen differenziert nach der Lernleistung

Von der Animation ist im Vergleich zu stehenden Bildern beim Erlernen von Begriffsbezeichnungen und sonstigem Faktenwissen keine Verbesserung zu erwarten. Die spezifische Wirksamkeit der animierten Darstellungen entfaltet sich lediglich in Bezug auf das Verständnis eines biologischen Prozesses.

Hypothese 2: Die spezifische lernförderliche Wirkung der Animation beschränkt sich auf das Verständnis. Das Faktenwissen wird im Vergleich zum Lernen mit stehenden Bildern nicht verbessert.

Wirksamkeit der beiden Lernumgebungen unter Berücksichtigung der Lernervariable „Vorwissen“

Die verständnisfördernde Wirkung der Animation kommt in erster Linie Schülerinnen und Schülern mit geringem themenspezifischen Vorwissen zugute. Schülerinnen und Schüler mit größerem Vorwissen zu einem Inhaltsbereich können genauso gut aus Lehrtexten mit stehenden Bildern und ohne Animationen ein Verständnis der dargestellten Sachverhalte entwickeln.

Hypothese 3: Die verständnisfördernde Wirkung der Animation lässt sich nur für Schülerinnen und Schüler mit geringem themenspezifischen Vorwissen nachweisen. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen lernen mit stehenden Bildern genauso gut.

Wirksamkeit der beiden Lernumgebungen unter Berücksichtigung der Lernervariable „Lernpräferenz“

Die verständnisfördernde Wirkung der Animation kommt in erster Linie Visualisierern zugute.

Hypothese 4: Die verständnisfördernde Wirkung der nicht interaktiven Animation lässt sich nur für Visualisierer nachweisen. Verbalisierer lernen mit Texten und stehenden Bildern ebenso gut wie mit Texten und Animationen.

2.2 Hypothese zur Wirksamkeit von Animationen und Simulationen

Im Vergleich zur Animation verbessern Manipulationen der Abläufe bei Simulationen in Form von Parameterauswahl das Verständnis der kausalen Beziehungen in einem komplexen biologischen System.

Hypothese 5: Simulationen (interaktive Animationen) fördern das Verständnis für kausale Zusammenhänge in einem komplexen System besser als Animationen ohne Interaktivität.

2.3 Hypothesen zur Wirksamkeit von Simulationen und ihren instruktionalen Hilfestellungen

Manipulierende Eingriffe in die dargestellten Prozesse durch Parameterauswahl bei Simulationen fördern nur den Erwerb von Verständnis, sofern bei den Lernenden keine kognitive Überlastung durch komplexe Lernumgebungen mit mehreren einstellbaren Parametern eintritt. Instruktionale Hilfestellungen können hier kompensatorisch und somit sowohl verständnisfördernd als auch reduzierend auf die kognitive Belastung wirken. Hier sind Unterschiede bei den Lernenden bezüglich ihres Vorwissens sowohl im Hinblick auf den Erwerb von Verständnis als auch für die kognitive Belastung zu erwarten.

Wirksamkeit von Simulationen und instruktionalen Hilfestellungen unter Berücksichtigung des Vorwissens im Hinblick auf das Verständnis

Hypothese 6a: Instruktionale Hilfestellungen verbessern die verständnisfördernde Wirkung einer Animation mit einstellbaren Parametern. Bei Lernenden mit höherem Vorwissen wirken sich diese zusätzlichen instruktionalen Maßnahmen weniger deutlich aus.

Wirksamkeit von Simulationen und instruktionalen Hilfestellungen unter Berücksichtigung des Vorwissens im Hinblick auf die kognitive Belastung

Hypothese 6b: Instruktionale Hilfestellungen vermindern die Gefahr einer kognitiven Überlastung. Bei Lernenden mit höherem Vorwissen wirken sich diese zusätzlichen instruktionalen Maßnahmen weniger deutlich aus.

IV METHODEN

In diesem Teil der Arbeit werden allgemein die Methoden vorgestellt, die in allen drei empirischen Studien dieser Arbeit angewendet wurden. Diesen Ausführungen werden in den Kapiteln der einzelnen empirischen Studien eigene Methodenteile folgen (s. V 3, VI 3 und VII 3), in denen die methodischen Besonderheiten der jeweiligen Studien verdeutlicht und weiter konkretisiert werden. Das Kapitel Methoden gliedert sich in vier Abschnitte. Im Abschnitt 1 wird das Konzept und die Anlage der Gesamtstudie vorgestellt. Der Abschnitt 2 ist dem in den Studien verwendeten Material gewidmet. Abschnitt 3 befasst sich mit der Erhebungsmethode. Zum Abschluss wird im Abschnitt 4 auf die verschiedenen Auswertungsmethoden eingegangen.

1 KONZEPT UND ANLAGE DER GESAMTSTUDIE

Im Folgenden soll die Anlage der gesamten Studie zunächst grob skizziert werden, bevor in den kommenden Abschnitten und in den Kapiteln zur Darstellung der empirischen Studien die Feinheiten expliziert werden (s. hierzu auch V 3, VI 3 und VII 3).

Zur Überprüfung der unter III 2 aufgeführten Forschungshypothesen wurde eine empirische Studie durchgeführt, die aus vier eigenen Teilen besteht. Die fachlichen Inhalte der vier Studien basieren jeweils auf einem eigenen Themengebiet aus der Physiologie biologischer Membranen. Studie 1 handelt von den allgemeinen Prinzipien biologischer Membranen. Dazu gehört ihr prinzipieller Aufbau und die Funktion von Transportprozessen. In der Studie 2 wird die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran behandelt. Studie 3 thematisiert die Primärreaktionen der Fotosynthese an den Thylakoidmembranen des Chloroplasten. Den Abschluss bildet die Studie 4, die sich inhaltlich mit der Erregungsbildung und -leitung an Nervenzellmembranen beschäftigt. Die vierte Studie wird hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Eine ausführliche Darstellung ihrer Ergebnisse erfolgt an anderer Stelle. Damit wird hier nur über diejenigen Studien berichtet, deren Themen im Lehrplan des 11. Jahrgangs in Schleswig-Holstein angesiedelt sind. Das Wissen über das komplexe Konzept der biologischen Membran wurde so bei ansteigender Komplexität der Unterrichtsinhalte kumulativ vermittelt, wobei zunächst allgemeine Prinzipien verdeutlicht wurden, auf die bei den Abgrenzungen der Spezialfälle innere Mitochondrienmembran, Thylakoidmembran und Nervenzellmembran immer wieder rekurriert wurde. Dadurch soll überprüft werden, ob die Annahmen über die Wirkung von Multimedia mit zunehmender Akkumulation von Wissen ihre Geltung behalten oder modifiziert werden müssen.

Diese erste Studie diente in erster Linie der Erprobung der Testinstrumente und Überprüfung der Eignung und Benutzerfreundlichkeit der Elemente in der Lernumgebung. Ab Studie 2 wurden dann die Forschungshypothesen überprüft. Entsprechend variiert die Anzahl der Experimentalgruppen in den empirischen Studien 1 bis 4. Somit wurden bei der Studie 1 (Biomembranen) nur eine Experimentalgruppe, bei der Studie 2 (Atmungskette) vier Experimentalgruppen, bei der Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese) fünf Experimentalgruppen und bei der Studie 4 (Nervenzellen) wiederum vier Experimentalgruppen eingerichtet. Die unterschiedliche Anzahl im hypothesenprüfenden Teil der Gesamtstudie (Studie 2 – 4) kommt dadurch zustande, dass die Wirksamkeit verschiedener Arten instruktorischer Unterstützung beim Lernen mit Simulationen von besonderem Interesse bei dieser Untersuchung ist.

Versuchspersonen waren Schülerinnen und Schüler der 11. Jahrgangsstufe aus 6 Biologiekursen an Gymnasien und 4 Biologiekursen an integrierten Gesamtschulen in Schleswig-Holstein. Die Einteilung der Versuchspersonen in die verschiedenen Experimentalgruppen wurde per Los entschieden. Die Dauer der computergestützten Lernsitzen sowohl der Einführung als auch der drei Teilstudien entsprach jeweils einer Schuldoppelstunde. Vor der einstündigen Bearbeitung der Lernprogramme wurden die Probanden sowohl bei der Einführung wie auch bei jeder Teilstudie per Fragebogen zu ihrem Computervorwissen und zu ihrer Lernpräferenz befragt. In diesem Vortest wurden des Weiteren Vorkenntnisse zu den Themen der Teilstudien differenziert nach Faktenwissen und Verständnis überprüft. Im Anschluss an die Bearbeitung der Lernprogramme wurden in einem Nachtest die kognitive Belastung der Versuchspersonen die Aufmerksamkeit bei der Programmbearbeitung und ihre Motivation (Gefallen an der Software und Interesse am Thema) erhoben. Dieser Nachtest enthielt darüber hinaus denselben Wissenstest wie der Vortest. Ungefähr 6 Wochen nach einer Lernsitzen wurde das themenspezifische Wissen der Probanden abermals überprüft. Dieser Follow-up-Test ist identisch mit dem Wissenstest aus Vor- und Nachtest.

Zur Überprüfung der unterschiedlichen Wirkungsweise der Lernumgebungen und ihrer Wechselwirkung mit den individuellen Lernvoraussetzungen werden in der Studie 2 (Atmungskette) und der Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese) zwei verschiedene Auswertungsstränge verfolgt. Beim ersten Auswertungsstrang finden verschiedene varianzanalytische Methoden Verwendung. Dabei betrachtet man die quantitativen Mittelwertsunterschiede im Hinblick auf die abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis*. Die abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* ergibt sich als Differenz aus der Summe aller erzielten Punkte im Nachtest und der Summe aller erzielten Punkte im Vortest. Sie setzt sich additiv aus den abhängigen Variablen *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* zusammen. Für diese beiden

Variablen werden jeweils nur die Differenzen erzielter Punkte aus Nach- und Vortest für die entsprechenden Skalen betrachtet. Der zweite Auswertungsstrang zielt dagegen auf die Aufklärung qualitativer Unterschiede innerhalb der Gesamtstichprobe und der Experimentalgruppen im Hinblick auf ihr Vorwissen und ihren Lernerfolg ab. Dazu werden probabilistische Testmodelle, insbesondere Latente Klassenmodelle, angewendet.

2 MATERIAL

2.1 Die Lernumgebungen der Studien

Alle Lernumgebungen wurden eigens für die drei Untersuchungen programmiert. Hierfür wurden die Autorenprogramme Toolbook II Instructor 7.2 (1999) und Macromedia Director 8 Shockwave Studio (2000) verwendet. Mittels dieser Entwicklungstools wurden multimediale Lernumgebungen erstellt, deren Bedienelemente mit denen eines üblichen Windowsprogramms übereinstimmen. Die Navigation in den Lernumgebungen erfolgt über dafür vorgesehene Buttons oder Hyperlinks. Informative Textseiten dienen der Motivation, der Einführung in die Thematik der Lernsitzung oder der Überleitung zwischen zwei Lernsequenzen. Zusammenfassungen einzelner Lernsequenzen werden ebenfalls als kurze Textseiten präsentiert. Die Lernsequenzen in einer Lernumgebung sind den Erfordernissen der verschiedenen Studien und Treatments angepasst. Hier variieren Text-Bild-Kombinationen, Text-Animations-Kombinationen und Simulationen, bei denen die Versuchspersonen durch Auswahl von Parametern einen animiert dargestellten Ablauf gezielt beeinflussen kann. Animierte Darstellungen wurden mit dem Macromedia Director 8 Shockwave Studio (2000) erstellt und in Form von Digital-Movies (*.mov) in die Lernumgebungen eingebettet. Diese werden mit Hilfe eines Mediaplayers in der Lernumgebung abgespielt. Mediaplayer bieten über das Abspielen hinaus die Möglichkeit, eine Animation anzuhalten, mehrfach abzuspielen oder über Schieberegler ein bestimmtes Bild in der Sequenz anzusteuern. Damit die Versuchspersonen ihren Lernerfolg überprüfen können, sind Multiple-Choice-Tests und / oder Lernkontrollfragen im Anschluss an eine Lernsequenz in die Programme eingebaut. Weiterhin wurde in jeder Studie in den verschiedenen Lernumgebungen ein sogenanntes Zusatzmaterial angeboten, mit dem sich die Versuchspersonen optional beschäftigen konnten, sofern sie den obligatorischen Teil der Lernumgebungen in kürzerer Zeit als vorgegeben bearbeitet hatten.

Da die Studie 1 (Biomembranen) auf die Evaluation des Versuchsmaterials und nicht auf die Hypothesenprüfung abzielte, wurde für diese Untersuchung nur eine gemeinsame Lernumgebung entwickelt, die alle Elemente der nachfolgenden Untersuchungen enthielt. Hierzu zählen Text-Bild-Kombinationen, Texte in Kombination mit animierten Darstellungen und Simulationen. In den Studien 2 (Atmungskette) und 3 (Fotosynthese), die der Analyse der Forschungshypothesen dienten, können vier (Atmungskette) bzw. fünf (Fotosynthese) verschiedene Typen von Lernumgebungen unterschieden werden, auf denen das experimentelle Design dieser Studien basiert. Bei der Standbildversion werden die zu vermittelnden biologischen Prozesse mit stehenden Bildern und Bewegungsindikatoren (z. B. Pfeile) dargestellt. Dazu sind jederzeit über hierfür vorgesehene Buttons ergänzende Lehrtexte abrufbar. Die Animationsversion unterscheidet sich von der Standbildversion nur in der bildlichen Darstellung der Vorgänge. In dieser Lernumgebung sind die stehenden Bilder durch animierte Darstellungen ersetzt, während die textlichen Informationen auch hier jederzeit zum Abrufen zur Verfügung stehen. Die in der Studie 2 bzw. in der Studie 3 eingesetzten Simulationen unterscheiden sich im Grad ihrer instruktionalen Unterstützung, sind aber inhaltlich identisch. Während eine Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung ausschließlich über Aufgabenstellungen und Lernkontrollfragen verfügt, ist eine Simulation mit umfassender instruktionaler Hilfe zusätzlich mit Hinweisen zur Bearbeitungsreihenfolge und mit Basisinformationen zum Inhalt ausgestattet. Eine detaillierte Beschreibung der Lernumgebungen in den Studien 1, 2, und 3 befindet sich jeweils im Methodenteil der Studie selbst (s. V 3, VI 3 und VII 3). Tabelle IV-1 bietet zunächst einen Überblick über die verschiedenen prinzipiellen Varianten der Lernumgebungen in der Studie 2 und der Studie 3.

Tabelle IV-1: Prinzipielle Varianten der Lernumgebungen in den hypothesenprüfenden Studien 2 (Atmungskette) und 3 (Fotosynthese)

Lernumgebung	Erläuterung
Standbildversion	Stehenden Bilder, in denen Dynamik durch Bewegungsindikatoren (Pfeile) symbolisiert wird, mit Lehrtexten
Animationsversion	Animationen mit Lehrtexten
Simulation mit minimaler Instruktion	Interaktive Animation mit einstellbaren Parametern, Aufgabenstellungen und Lernkontrollfragen
Simulation mit umfassender Instruktion ²	Wie Simulation mit minimaler Instruktion, zusätzlich mit Hinweisen zur Bearbeitungsreihenfolge und Basisinformationen zum Inhalt

2.2 Die Erhebungsinstrumente

Die Daten wurden in allen Studien per Fragebogen erhoben. Vollständige Abdrucke dieser Instrumente finden sich im Anhang (s. IX 6). An dieser Stelle werden zunächst die Grundlagen und Gemeinsamkeiten aller in den drei Untersuchungen verwendeten Fragebögen herausgestellt. Ihre spezifischen Unterschiede und charakteristischen Kennwerte werden in den entsprechenden Kapiteln der empirischen Studien berichtet werden.

2.2.1 Vortest

Mit dem Vortest wurden Personendaten, Computerkenntnisse und Interesse an diesem Medium, die Lernpräferenz sowie die jeweiligen themenspezifischen Fachkenntnisse der einzelnen Studien differenziert nach Faktenwissen und Transfer erhoben.

- Personendaten

Zur Anonymisierung der Fragebögen aus datenschutzrechtlichen Gründen wurden die Versuchspersonen angewiesen, ein persönliches Kennzeichen bestehend aus den Initialen des Vaters und dem Geburtstag der Mutter (vierstellig, TTMM) zu erstellen. Des Weiteren wurde in den Studien 2 und 3 das Geschlecht und auch die Zugehörigkeit zur Experimentalgruppe erhoben, um eine konstante Zuordnung der Personen zu ebendiesen Experimentalgruppen in den nächsten Studien zu gewährleisten.

- Computerkenntnisse (Computerwissen und Computerinteresse)

Zur Messung der Computerkenntnisse und des Interesses an Computern wurden zwei Skalen von Urhahne (2002) verwendet, die jeweils aus vier Items bestanden. Diese Skalen hatten ein vierstufiges Antwortformat („trifft nicht zu“, „trifft etwas zu“, „trifft ziemlich zu“, „trifft völlig zu“) zum Ankreuzen.

- Lernpräferenz

Zur Erfassung der Lernpräferenz bearbeiteten die Versuchspersonen zwei auf der Theorie der dualen Kodierung basierende Skalen zu bildlichen und verbalen Gewohnheiten und Fähigkeiten nach Paivio und Harshman (1983). Die Items zur Messung der verbalen Fähigkeiten wurden zwei Subskalen entnommen, die einerseits die verbalen Fähigkeiten in Form des guten sprachlichen Ausdrucks (4 Items) abfragten, andererseits die selbstberichteten Leseschwierigkeiten (2 Items) der Versuchspersonen erfassten. Die Items zur Erfassung der visuellen Gewohnheiten und Fähigkeiten wurden ebenfalls von zwei Subskalen abgeleitet, von denen die erste die gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen (4 Items) erfragte, während die zweite spezieller das Verwenden von visuellen Vorstellungen beim Problemlösen (2 Items) erfasste. Die Skalen waren mit einem vierstufigen Antwortformat („trifft nicht zu“, „trifft etwas zu“, „trifft ziemlich zu“, „trifft völlig zu“) zum Ankreuzen versehen.

- Themenspezifisches Wissen / Fachkenntnisse

Die Kenntnisse zu den biologischen Inhalten in den einzelnen Studien wurden einerseits durch Aufgaben ermittelt, die bereits vorhandenes Faktenwissen überprüften. Andererseits wurde durch weitere Aufgabenstellungen, die von den Versuchspersonen eine Anwendung ihres Wissens und darüber hinaus Schlussfolgerungen erforderten, das themenspezifische Verständnis anhand dieser Transferleistungen überprüft. Die Fachkenntnisse der Versuchspersonen wurden in den verschiedenen Studien entweder durch Items im Multiple-Choice- bzw. Singel-Choice-Format oder mit offenen Fragen erfasst. Zu einem Choice-Item wurden jeweils vier Antworten vorgegeben, von denen eine oder mehrere richtige Antworten auszuwählen waren. Näheres zu der genauen Vorgehensweise in den einzelnen Studien (s. V 3.3, VI 3.3 und VII 3.3).

Tabelle IV-2: Übersicht über die gemessenen Konstrukte in den Vortests der Studien 1-3

Variable	Subskala	N der Items	Itembeispiel
Computerkenntnisse (motivationale und kognitive Kontrollvariable)	Computerinteresse	4	Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.
	Computerwissen	4	Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.
Verbale Lernpräferenz (kognitive Kontrollvariable)	Guter sprachlicher Ausdruck	4	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.
	Lesekompetenz	2	Es fällt mir leicht Texte zu lesen.
Visuelle Lernpräferenz (kognitive Kontrollvariable)	Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen	4	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken.
	Benutzung von bildlichen Vorstellungen beim Problemlösen	2	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor.
Themenspezifisches Wissen	Faktenwissen	variabel	
	Verständnis	variabel	

2.2.2 Nachtest

Mit dem Nachtest wurden die subjektive Einschätzung der kognitiven Belastung und der Aufmerksamkeit bei der Bearbeitung des Lernprogramms sowie das Interesse an der Lernsoftware und dem Thema erfasst. Darüber hinaus wurden wie im Vortest die jeweiligen themenspezifischen Fachkenntnisse der einzelnen Studien differenziert nach Faktenwissen und Verständnis erhoben.

- Kognitive Belastung

Zur Erfassung der kognitiven Belastung wurde eine nach Urhahne (2002) adaptierte Skala verwendet, die durch vier Subskalen unterschiedliche Aspekte des Konstrukts „Kognitive Belastung“ abbildete. Dazu gehörten die Selbsteinschätzung der benötigten Anstrengung (2 Items) , die Wahrnehmung der Komplexität der Lernumgebung und der biologischen Inhalte (2 Items) sowie die subjektive Beurteilung der geistigen Auslastung (2 Items) und die selbstberichtete Bewertung des inhaltlichen Verständnisses (2 Items). Diese vier von Urhahne (2002) konstruierten Skalen waren mit einem fünfstufigen Antwortformat versehen („gar nicht“ bis „sehr / extrem“).

- Aufmerksamkeit

Mit einer weiteren Skala wurde die Aufmerksamkeit und die Konzentration während des Lernvorgangs (2 Items) erfasst. Diese Skala hatte ebenfalls ein fünfstufiges Antwortformat zum Ankreuzen nach obigem Vorbild.

- Interesse

Für die Messung der motivationalen Kontrollvariable „Interesse“ wurde den Versuchspersonen eine nach Wigfield und Eccels (s. Urhahne, 2002) adaptierte Skala (5 Items) mit ebenfalls fünfstufiger Bewertungsmöglichkeit („überhaupt nicht“ bis „sehr / äußerst zutreffend“) vorgegeben. Die Skala hatte einen heterogenen Charakter und bezog sich sowohl auf die biologischen Inhalte („task value“) als auch auf die Gestaltung der Lernumgebung („tool value“).

- Themenspezifisches Wissen / Fachkenntnisse

Zur Messung des Lernerfolgs nach der Bearbeitung der Lernprogramme wurde den Versuchspersonen derselbe Fragebogen wie zur Messung der themenspezifischen Vorkenntnisse einer Studie vorgelegt. Die Kenntnisse zu den biologischen Inhalten einer Studie wurden damit auch nach der Lernsitzung durch dieselben Aufgaben ermittelt, die erworbenes Faktenwissen und darüber hinaus Verständnis in Form von anwendbarem Wissen und Transferleistungen überprüften.

Tabelle IV-3: Übersicht über die gemessene Konstrukte in den Nachtests der Studien 1-3

Variable	Subskala	N der Items	Itembeispiel
Kognitive Belastung (kognitive Kontrollvariable)	Anstrengung	2	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?
	Komplexität der Inhalte und der Lernumgebung	2	War das Lernprogramm für Sie eher zu leicht oder eher zu schwer?
	Geistige Auslastung	2	Fühlten Sie sich durch die Komplexität (Auswahlmöglichkeiten, komplizierte Inhalte) des Lernprogramms geistig überlastet?
	Inhaltliches Verständnis	2	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?
Aufmerksamkeit (motivationale Kontrollvariable)		2	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?
Interesse (motivationale Kontrollvariable)		5	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?
Themenspezifisches Wissen	Faktenwissen	variabel	
	Verständnis	variabel	

2.2.3 Follow-up-Test

Mit einem Follow-up-Test wurden sechs Wochen im Anschluss an die Datenerhebungen der Studien 2 und 3 die themenspezifischen Kenntnisse der Versuchspersonen abermals überprüft. Dieser Follow-up-Test enthielt dieselben Items wie diejenigen Teile von Vor- und Nachtest, die die Fachkenntnisse getrennt nach Faktenwissen und Verständnis erhoben hatten. Die Follow-up-Tests werden hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Auf ihre Auswertung, die Ergebnisdarstellung und Diskussion der resultierenden langfristigen Effekte soll in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

3 ERHEBUNGSMETHODE

Im Rahmen der lehrplanmäßigen Konzeption des Biologieunterrichts der 11. Jahrgangsstufe wurden die vier Studien in den Unterrichtsverlauf des zweiten Schulhalbjahres 2000/2001 eingegliedert. Für eine Datenerhebung mit der computergestützten Lernsitzung wurde jeweils eine Schuldoppelstunde veranschlagt. Die Termine wurden kurzfristig nach Rücksprache mit den teilnehmenden Lehrkräften vereinbart. In diesen Lernsitzungen erarbeiteten sich die Schülerinnen und Schüler kooperativ (Studie 1) bzw. einzeln (Studien 2 und 3) an Computerarbeitsplätzen die Wissensschwerpunkte der Studien. Hierzu wurden die Arbeitsplätze der lokalen Computerräume in den teilnehmenden Schulen ggf. um Notebookarbeitsplätze aus den Beständen des IPN ergänzt. Zur Überprüfung der Forschungshypothesen ergaben sich basierend auf den vorgestellten Lernumgebungen (s. VI 3.1 und VII 3.1) unterschiedliche Experimentalgruppendesigns (s. Tabelle IV-1). Instruktionale Maßnahmen wie Anleitungen zur Programmbedienung und inhaltliche Erläuterungen befanden sich in den ausgeteilten Tischvorlagen bzw. innerhalb der computergestützten Lernumgebung. Darüber hinausgehende Informationen beschränkten sich damit auf Organisatorisches zum Ablauf der bevorstehenden Doppelstunde sowie auf die abschließende Ankündigung des weiteren Vorgehens in der nächsten Studie. Damit wurden die Einflüsse, die von den Versuchsleitern und der Lehrkraft ausgingen, innerhalb eines computergestützten Unterrichtsabschnitts minimiert. Zwischen den computergestützten Doppelstunden fand der normale Biologieunterricht der 11. Jahrgangsstufen durch den jeweiligen Biologielehrer mit den weiteren im Lehrplan vorgesehenen Lerninhalten statt. Der Biologieunterricht durch die Lehrkraft stellte damit die thematische Verbindung zwischen den computergestützten Doppelstunden her. Die Studien fanden auf diese Weise als Feldstudien im Sinne der ökologischen Validität unter den realen Bedingungen der schulischen Praxis statt. Störvariablen aus dem schulischen und privaten Kontext der Schülerinnen und Schüler wurden durch geeignete Zusammensetzung der Experimentalgruppen randomisiert, es war aber zu erwarten, dass sich diese Störvariablen ungünstig auf die Gesamtvarianz der zu messenden Kurz- und Langzeiteffekte auswirkten.

3.1 Die Versuchspersonen

Die Versuchspersonen der vier Studien wurden aus Biologiekursen des 11. Jahrgangs der gymnasialen Oberstufe an Gymnasien und Gesamtschulen in Schleswig-Holstein zusammengestellt. Zur Teilnahme an den vier Einzelerhebungen erklärten sich sieben Gymnasialkurse und vier Gesamtschulkurse bereit. Die Anzahl der Schülerinnen und Schüler variierte von 8 bis 25 in den verschiedenen Kursen. Im Verlauf der drei Datenerhebungen war die Zahl der Versuchspersonen starken Schwankungen unterworfen, deren Ursachen einerseits auf den schulischen Kontext und individuelle Befindlichkeiten zurückzuführen sind (Klassenfahrten, Projekttag, Krankheit). Ein Gymnasialkurs nahm lediglich an der ersten Studie teil, da der Biologielehrer längerfristig erkrankte. Andererseits musste die Software der zweiten Studie nach den anfänglichen Erhebungen in zwei Kursen am Gymnasium aus technischen Gründen nochmals modifiziert werden, so dass sie aus der Datenauswertung für die Studie 2 herausgenommen wurden. Die Versuchspersonen dieser beiden Kurse wurden aber in der Studie 3 wieder mitberücksichtigt. Eine detaillierte Auflistung der Teilnehmerzahlen für die drei in dieser Arbeit berücksichtigten Studien findet sich im nächsten Abschnitt.

3.2 Die Experimentalgruppen

Die Studie 1 hatte evaluativen Charakter. Sie diente der prinzipiellen Testung der Lernumgebung und Auslotung ihres fachlichen Niveaus sowie der weiteren Validierung der allen Studien gemeinsamen Erhebungsinstrumente, insbesondere der Teile des Vor- und Nachtests, die die psychologischen Merkmale der Versuchspersonen erfassen sollten (s. IX 6). Darüber hinaus erhielten die Versuchspersonen so einen Einblick in die Erhebungsmethode. In der Studie 1 wurde die Stichprobe nicht wie in den folgenden Studien den Treatments entsprechend eingeteilt. Hier wurde nur die Gesamtstichprobe in einer Experimentalgruppe bestehend aus 185 Versuchspersonen untersucht, wobei die Versuchspersonen z.T. zu zweit an einem Computerarbeitsplatz das Lernprogramm bearbeiteten.

Die Experimentalgruppen der Studien 2 und 3 basieren auf den unter VI 3.1 und VII 3.1 beschriebenen Lernumgebungen. Demnach wurden die Versuchspersonen in der Studie 2 in vier, in der Studie 3 in fünf Gruppen eingeteilt. Die erste Experimentalgruppe bearbeitete in diesen beiden Studien die Standbildversion, in der die Prozesse der Atmungskette bzw. der Fotosynthese durch stehende Bilder mit Bewegungsindikatoren dargestellt wurden. Die

zweite Experimentalgruppe erhielt zur Bearbeitung die Animationsversion der Prozesse der Atmungskette bzw. der Fotosynthese. Die dritte und vierte Experimentalgruppe der Studie 2 bzw. die dritte, vierte und fünfte Experimentalgruppe der Studie 3 arbeiteten mit den verschiedenen Simulationen, die sich im Grad ihrer instruktionalen Unterstützung unterscheiden. Die weiteren Details hierzu entnehme man VI 3.1 und VII 3.1.

Zu Beginn der Datenerhebung der Studie 2 wurden die Versuchspersonen in die einzelnen Experimentalgruppen eingeteilt. Um eine Randomisierung der Versuchsgruppen zu erreichen, erfolgte die Zuordnung per Los beim Eintreten der Personen in den örtlichen Computerraum. Die Personen einer Experimentalgruppe entsprachen also keinen Kursgruppen aus der Schule, sondern setzten sich aus Schülerinnen und Schülern verschiedener Schulen und Kurse zusammen. Die resultierende Zusammensetzung der Versuchsgruppen wurde für die nachfolgende Studie beibehalten.

Im Verlauf der Studie 2 fiel die Entscheidung, eine weitere Simulationsgruppe in der Studie 3 einzuführen. Daraus folgten zwei Konsequenzen.

1. In Studie 2 wurden die beiden vorhandenen Simulationsgruppen überproportional aufgestockt. Dadurch konnte die neue Experimentalgruppe in Studie 3 zu etwa gleichen Teilen aus den beiden bestehenden Simulationsgruppen zusammengesetzt werden.

2. Personen, die aus den o.g. Gründen nicht an der Studie 2 teilgenommen hatten und damit noch keiner Experimentalgruppe zugeordnet waren, wurden in der Studie 3 vom Versuchsleiter gleichmäßig auf die beiden schon bestehenden und die neue Simulationsgruppe verteilt.

Dies ist lediglich für die Auswertung von langfristigen Effekten von Bedeutung und wird dort entsprechend berücksichtigt werden. Die nachfolgende Tabelle fasst die Besetzungen der Experimentalgruppen zusammen.

Tabelle IV-4: Übersicht über die Besetzung der Experimentalgruppen in den Studien; Angaben in Versuchspersonen, die bei der Auswertung des Vor- und Nachtests berücksichtigt werden konnten.

Lernumgebung	Experimentalgruppe	Studie 1	Studie 2	Studie 3
		Biomembranen	Atmungskette	Fotosynthese
1	Standbild	-	28	30
2	Animation	-	27	30
3	Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	-	-	33
4	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	-	39	30
5	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	-	37	27
	Summe:	185	131	150

3.3 Ablauf der computergestützten Lernsitzen

Um störende Unterbrechungen während der Datenerhebung zu vermeiden und um in Studie 2 und 3 eventuelle Kommunikation über die computergestützte Lernsitzen zwischen den Versuchspersonen zu verhindern, wurde im voraus vereinbart, dass die Schülerinnen und Schüler auf ihre regulären Pausenzeiten im Verlauf der Doppelstunde der Datenerhebung verzichten. Zur Datenerhebung einer Studie standen damit 90 min en block zur Verfügung, was einer Schuldoppelstunde entspricht.

Zu Beginn jeder computergestützten Lernsitzen standen den Versuchspersonen zur Bearbeitung des Vortests 12 min zur Verfügung. Um hier ein zeitaufwendiges Ausfindigmachen von Personen zu vermeiden, die bezüglich ihrer Computerkenntnisse und Lernpräferenzen in einer vorangegangenen Studie noch keine Angaben gemacht hatten, musste dieser Teil des Vortests in jeder der vier Studien abgefragt werden (s. IX 6). Im Anschluss an den Vortest bearbeiteten die Versuchspersonen das Lernprogramm der Studie 1 bzw. in den darauffolgenden Studien 2 und 3 die Version der Lernumgebung, die ihnen das Los zugewiesen hatte. Die Bearbeitungszeit des computergestützten Lernmaterials betrug 60 min. Im Anschluss an die computergestützte Lernsitzen wurde den Versuchspersonen der Nachtest (s. IX 6) zur Bearbeitung vorgelegt. Die Bearbeitungszeit hierfür betrug ebenso wie für den Vortest 12 min.

Zur Erfassung der langfristigen Wirkung des computergestützten Unterrichts wurde jeweils ca. sechs Wochen nach den Lernsitzen der Studien 2 und 3 in einem Follow-up-Test der Lernerfolg differenziert nach Faktenwissen und Verständnis noch einmal anhand derselben themenspezifischen Items wie in Vor- und Nachtest erhoben. Die Follow-up-Tests wurden den teilnehmenden Lehrern mit frankierten Rückumschlägen und einem Begleitschreiben per gelber Post zugesandt. In dem Schreiben wurden die Lehrkräfte darum gebeten, den Test mit ihren Kursen zum nächstmöglichen Zeitpunkt durchzuführen und dabei den Schülerinnen und Schülern nicht länger als 15 min zur Bearbeitung einzuräumen. Aufgrund dieser Einbettung des Follow-up-Tests in den normalen Unterrichtsverlauf der 11. Jahrgangsstufe mit Durchführung durch die jeweilige Lehrkraft musste damit gerechnet werden, dass sich dabei Störvariablen deutlich stärker auswirken als innerhalb einer einzelnen computergestützten Lernsitzen. Der zeitliche Abstand zwischen der computergestützten Lernsitzen und der Durchführung des Follow-up-Tests variierte darüber hinaus zwischen 6-10 Wochen. Tabelle IV-5 fasst den Verlauf der Datenerhebungen schematisch zusammen.

Tabelle IV-5: Schema der Datenerhebung in den Studien 1-3

Computergestützte Lernsitzen/ Datenerhebung	Begrüßung, Organisatorisches	3 min	
	Vortest	12 min	<ul style="list-style-type: none"> • Computerkenntnisse (Wissen und Interesse) • Visuelle oder verbale Lernpräferenz • Themenspezifisches Vorwissen zur jeweiligen Lernsitzen (Faktenwissen, Verständnis)
	Bearbeitung der computergestützten Lernumgebung(en)	60 min	<ul style="list-style-type: none"> • Studie 1 (Biomembranen): Kooperative Bearbeitung der Lernumgebung in Zweiergruppen • Studien 2 (Atmungskette) und 3 (Fotosynthese): individuelle Bearbeitung der Lernumgebungen (Standbild, Animation und Simulationen)
	Nachtest	12 min	<ul style="list-style-type: none"> • Kognitive Belastung • Aufmerksamkeit • Interesse (an den biologischen Inhalten, an der Gestaltung der Software) • Themenspezifisches Wissen (Faktenwissen, Verständnis)
	Danksagung, Verabschiedung	3 min	
	Follow-up-Test	ca. 15 min	<ul style="list-style-type: none"> • Themenspezifisches Wissen (Faktenwissen, Verständnis)

4 AUSWERTUNGSMETHODEN

Die Daten der drei Studien wurden mit zwei sich ergänzenden Auswertungsverfahren analysiert. Die deskriptive Statistik und inferenzstatistische Methoden basieren auf den Annahmen der klassischen Testtheorie. Im Gegensatz dazu liegt den latenten Klassenanalysen ein probabilistisches Testmodell zugrunde. Die beiden unterschiedlichen Verfahrensweisen werden in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich dargestellt.

4.1 Deskriptive Statistik und inferenzstatistische Methoden

Die in diesem Abschnitt beschriebene deskriptive Statistik und Inferenzstatistik basieren auf den Axiomen der klassischen Testtheorie. Das Modell der klassischen Testtheorie geht davon aus, dass das Ergebnis eines Tests den Ausprägungsgrad eines untersuchten Merkmals bestimmt, jedoch stets von einem Messfehler überlagert ist. Der Testwert repräsentiert damit die „wahre“ Merkmalsausprägung zu- bzw. abzüglich der Fehlerkomponente (Axiome der klassischen Testtheorie (Bortz, 1999; Bortz & Döring, 1995; Rost, 1996)).

Die hier beschriebenen Analysen wurden sämtlich mit dem Statistik-Programm SPSS 10.0 für Windows (2001) angefertigt. Im Folgenden werden zunächst die Operationalisierungen der unabhängigen und abhängigen Variablen vorgestellt, bevor die quantifizierenden inferenzstatistischen Verfahren näher erläutert werden.

4.1.1 Unabhängige Variablen

Gestaltungweise der Lernumgebungen

Die Gestaltungweise der Lernumgebungen (Standbild, Animation, Simulation, Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen) geht in die Datenanalysen als unabhängige Variable ein. Sie ist entsprechend der Ausprägungen in den beiden hypothesenprüfenden Studien 2 und 3 mehrfach gestuft.

Themenspezifisches Vorwissen

Das themenspezifische Vorwissen wird bei dieser Datenauswertung als weitere unabhängige Variable berücksichtigt. Um zwei Gruppen mit unterschiedlich großem Vorwissen zu definieren, wurde in jeder der drei Studien eine Clusteranalyse durchgeführt. Diese Clustereinteilungen basierten auf den partiellen Summenscores, die die Versuchspersonen im Faktenwissensteil des Vortests einer Studie erzielt hatten. Damit wurden die zwei Gruppen mit unterschiedlich großem Vorwissen in Studie 1 basierend auf der Summe der Items 1-6 eingeteilt, während bei der Auswertung der Studie 2 und der Studie 3 der Summenscore aus den jeweiligen Items 1-7 den beiden unterschiedlichen Clustern zugrunde liegt. Eine detaillierte Beschreibung der Analyse und der beiden resultierenden Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissen befindet sich im jeweiligen ersten Ergebnisteil der drei Studien (s. 0, VI 4 und VII 4).

Lernpräferenz

Als letzte unabhängige Variable geht die Lernpräferenz in die Datenauswertung ein. Die Festlegung der beiden Gruppen mit unterschiedlicher Lernpräferenz erfolgte durch eine Clusteranalyse auf der Basis der Mittelwerte der Skalen „verbale Lernpräferenz“ und „visuelle Lernpräferenz“. Dadurch wurden die „Verbalisierer“ mit stärkerer verbaler Lernpräferenz von den stärker visuell orientierten „Visualisierern“ getrennt. Die beiden Gruppen unterscheiden sich damit maximal in ihren subjektiven Einschätzungen sowohl zu ihren verbalen als auch zu ihren visuellen Fähigkeiten. Diese Analyse wurde für jede Studie separat durchgeführt. Näheres zu den Ergebnissen der Clusteranalysen entnehme man daher den Ergebnisteilen der Studien (s. 0, VI 4 und VII 4).

4.1.2 Abhängige Variablen

Lernzuwachs gesamt, Faktenwissen und Verständnis

Die abhängige Variable *Lernzuwachs gesamt* wird in zwei weitere Kategorien, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis*, eingeteilt. Zur Analyse der Veränderung im Hinblick auf das Faktenwissen und die Verständnisleistung wurde daher in den Vor- und Nachtests der Studien von den Versuchspersonen themenspezifisches Wissen differenziert nach diesen beiden Kategorien erhoben. Die Anzahl der Items und damit die Länge der beiden Skalen, von denen stets die erste das Memorieren der themenspezifischen Fakten und die zweite ihre Anwendung mit daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen und so das Verständnis überprüfte, variierte von Studie zu Studie. Innerhalb einer Studie wurden aber das Faktenwissen und das Verständnis der Versuchspersonen jeweils mithilfe derselben Items in Vor- und Nachtest überprüft. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass die Veränderungen in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis sowie der Lernzuwachs insgesamt als direkte Differenz aus Nachtest- und Vortestergebnis bestimmt werden können, ohne aufwendige Transformationen vornehmen zu müssen. Das Maß für die abhängigen Variable *Lernzuwachs gesamt* ist daher die Differenz aus erzielter Punktzahl im Nachtest und erzielter Punktzahl im Vortest. Es setzt sich additiv aus den Werten der beiden abhängigen Variablen *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* zusammen. Zur Bestimmung des Wertes für die abhängigen Variablen *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* werden entsprechend die Summenscores der jeweiligen Subskalen aus Nachtest und Vortest voneinander subtrahiert. Tabelle IV-6 zeigt eine Übersicht zur Berechnung der abhängigen Variablen.

Tabelle IV-6: Berechnung der abhängigen Untersuchungsvariablen

Lernzuwachs gesamt	$\sum_{i=1}^n a_i - \sum_{i=1}^n b_i$	i = Item a = Itempunktzahl im Nachtest
Zuwachs Faktenwissen	$\sum_{i=1}^m a_i - \sum_{i=1}^m b_i$	b = Itempunktzahl im Vortest n = Anzahl aller Items
Zuwachs Verständnis	$\sum_{i=m+1}^n a_i - \sum_{i=m+1}^n b_i$	m = Anzahl der Faktenwissenitems

Kognitive Belastung

Als weitere abhängige Variable wird die kognitive Belastung betrachtet. Zur detaillierten Analyse der Auswirkung der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg wurde in den Nachtests aller Studien von den Versuchspersonen ihre subjektive Wahrnehmung dieser Einflussgröße erhoben. In Abhängigkeit von den verschiedenen Lernumgebungen und dem Vorwissen wurden Mittelwertsvergleiche bezüglich der kognitiven Belastung angestellt. Ein Zusammenhang zwischen kognitiver Belastung und Lernerfolg wurde im Anschluss durch die Berechnung von Korrelationen bestimmt (s. 0, VI 4 und VII 4).

4.1.3 Inferenzstatistik

Dieser Abschnitt befasst sich mit den inferenzstatistischen Verfahren, die auf den Axiomen der klassischen Testtheorie begründet sind. Zunächst werden die Methoden zur Überprüfung von Mittelwertsunterschieden dargestellt und im Anschluss daran die Methoden zur Überprüfung von Zusammenhängen kurz erläutert. Für ausführliche Erläuterungen dieser Methoden sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (Bortz, 1999; Bortz & Döring, 1995).

4.1.3.1 Verfahren zur Überprüfung von Mittelwertsunterschieden: t-Test, einfaktorielle und zweifaktorielle Varianzanalyse

Zur Analyse der Daten wurden zur Überprüfung von Mittelwertsunterschieden t-Tests, einfaktorielle Varianzanalysen und zweifaktorielle Varianzanalysen verwendet. Mit dem t-Test werden bei den hier durchgeführten Datenanalysen stets nur zwei unabhängige Stichproben auf die Unterschiedlichkeit ihrer Mittelwerte überprüft. Die Varianzanalyse ist ein Verfahren, das die Mittelwertsunterschiede zwischen mehr als zwei Gruppen analysiert. Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse werden die Stufen einer kategorialen unabhängigen Variablen im Hinblick auf eine intervallskalierte abhängige Variable verglichen. Entsprechend werden bei einer zweifaktoriellen Varianzanalyse zwei kategoriale unabhängige Variablen sowie deren Kombinationen im Hinblick auf eine abhängige intervallskalierte Variable miteinander verglichen. Einzelvergleiche zwischen zwei Mittelwerten innerhalb eines mehrfachgestuften Faktors wurden mittels a-priori-Kontrasttests entsprechend der Hypothesen untersucht.

4.1.3.2 Korrelationen

Der Korrelationskoeffizient r einer Produkt-Moment-Korrelation beschreibt die Enge eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei intervallskalierten Variablen. Durch ihn wird ein Zusammenhang lediglich mathematisch formuliert, aus dem sich jedoch keine Kausalität ableiten lässt. Der Wertebereich von r liegt zwischen -1 und 1 . Gilt $r > 0$, verändern sich die beiden Variablen in die gleiche Richtung. Entsprechend verhalten sich die Variablen gegenläufig zueinander, falls $r < 0$. Falls $r = 0$, besteht kein linearer Zusammenhang.

Tabelle IV-7: Klassifikation des Korrelationskoeffizienten r

$ r $	Effekt
bis 0,2	sehr geringe Korrelation
bis 0,3	geringe Korrelation
bis 0,7	mittlere Korrelation
bis 0,9	hohe Korrelation
$> 0,9$	sehr hohe Korrelation

4.1.4 Auswertungsschema zur Überprüfung der Forschungshypothesen³

Tabelle IV-8: Auswertungsschema zur Überprüfung der Forschungshypothesen auf der Basis inferenzstatistischer Methoden

Hypothese	Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen	Testmethode
	Faktor 1	Faktor 2 (Gestaltungsweise der Lernumgebung)		
1	–	<ul style="list-style-type: none"> • Standbild • Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt 	<ul style="list-style-type: none"> • t-Test
2	–	<ul style="list-style-type: none"> • Standbild • Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • t-Tests
3	Themenspezifisches Vorwissen (gering, hoch)	<ul style="list-style-type: none"> • Standbild • Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Zweifaktorielle Varianzanalyse
4	Lernpräferenz (Verbalisierer, Visualisierer)	<ul style="list-style-type: none"> • Standbild • Animation 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Zweifaktorielle Varianzanalysen
5	–	<ul style="list-style-type: none"> • Animation • Alle Simulationen (zusammengefasste Gruppe) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • t-Tests
5	–	<ul style="list-style-type: none"> • Animation • [Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung] • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1 • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfaktorielle Varianzanalysen mit Kontrasttests

Hypothese	Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen	Testmethode
	Faktor 1	Faktor 2 (Gestaltungsweise der Lernumgebung)		
6.1 AK	–	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1 • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • t-Test
6.1 FS	–	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung • Simulation mit Instruktionen (zusammengefasste Gruppe) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • t-Test
6.1 FS	–	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1 • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Lernzuwachs gesamt • Zuwachs Faktenwissen • Zuwachs Verständnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfaktorielle Varianzanalyse mit Kontrasttests
6.2	Themenspezifisches Vorwissen (gering, hoch)	<ul style="list-style-type: none"> • [Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung] • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1 • Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuwachs Verständnis • Kognitive Belastung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zweifaktorielle Varianzanalyse (mit Kontrasttest für Faktor 1)

AK = Analyse in Studie 2 (Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran), FS = Analyse in Studie 3 (Primärreaktionen Fotosynthese)

4.2 Probabilistische Testmodelle

Im Unterschied zur Anwendung der klassischen Testtheorie auf die Daten, bei der in dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass die Itemantworten „wahre“ Messwerte (\pm Fehlervariable) darstellen, befasst sich die probabilistische Testtheorie mit der Modellierung des Antwortverhaltens auf Basis der einzelnen Itemantworten, um daraus erst Messwerte abzuleiten (Rost, 1999). Grundsätzlich können zwei Arten der Testauswertungen unterschieden werden, eine quantifizierende und eine klassifizierende Variante. Während eine *quantifizierende Testauswertung* darauf abzielt, den graduellen Ausprägungsgrad einer Eigenschafts- oder Fähigkeitsdimension zu bestimmen, werden bei der *klassifizierenden Testauswertung* qualitative Personenunterschiede über das Profil der Itemantworten erfasst. Die Geltung quantifizierender Modelle wurde zwar im Rahmen der Datenauswertung für die Studien 2 und 3 überprüft; sie konnten jedoch keine Anwendung finden (s. VI 4.3.2 und VII 4.3.2). Näheres hierzu entnehme man daher der Literatur (Rost, 1996).

Die Erstellung solcher probabilistischer Testmodelle wurde mit dem Programm Winmira 2001 (Davies, 2001) durchgeführt. Ergänzend zu diesem Programm wurden die Zuordnungswahrscheinlichkeiten mit Microsoft Excel berechnet. Kreuztabellierungen und deskriptive Statistiken wurden mit dem Statistikprogramm SPSS 10.0 für Windows (2001) angefertigt.

Im folgenden ersten Abschnitt wird daher nur die klassifizierende Testauswertung weiter konkretisiert. Im daran anschließenden zweiten Abschnitt werden Verfahren und Kriterien für die Bewertung der Passung eines Modells auf einen vorliegenden Datensatz erläutert (Überprüfung der Modellgeltung). Abschließend werden im dritten Abschnitt allgemeine Prinzipien und Besonderheiten der Anwendung klassifizierender Testauswertung bei Veränderungsmessungen vorgestellt.

4.2.1 Klassifizierende Testauswertung: Latente Klassenanalyse (LCA)

Bei einer klassifizierenden Testauswertung bildet die Erfassung von qualitativen Personenunterschieden über das Profil der Itemantworten den Fokus des Interesses. Gesucht ist eine Klassifikation der Personen, bei der sich die Personen in ihrem Antwortverhalten innerhalb der Klassen minimal, zwischen den Klassen jedoch maximal unterscheiden. Solche Testmodelle werden als *latente Klassenmodelle* bezeichnet. Bei der latenten Klassenanalyse ist die Anzahl der latenten Klassen, in die die Probanden zu unterteilen sind, kein zu schätzender Modellparameter. Die Anzahl der latenten Klassen ist vielmehr durch theoretische Überlegungen begründet und wird bei der Modellierung

vorgegeben. Es werden stets mehrere „plausible“ Modelle mit verschiedenen Klassenanzahlen berechnet und das beste im nachhinein anhand von Modellgeltungskontrollen (s. 4.2.3 in diesem Kapitel) ermittelt. Die latente Klassenanalyse berechnet bei vorgegebener Klassenanzahl die Itemschwierigkeiten⁴ für jede Klasse. Als Messwerte des Modells werden daraus für jede Person und jede Klasse Zuordnungswahrscheinlichkeiten generiert, mit denen die Person den Klassen des Modells angehört. Eine Person wird abschließend derjenigen Klasse des Modells zugeordnet, der sie am wahrscheinlichsten angehört, d. h. für die ihre Zuordnungswahrscheinlichkeit maximal ist.

4.2.2 Die Modellgleichung

Der latenten Klassenanalyse liegen relativ schwache Modellannahmen zugrunde. Zur Herleitung der Modellgleichung werden diese Annahmen im Folgenden weiter ausgeführt.

1. Alle Angehörigen einer Klasse g lösen das Item i mit einer konstanten Lösungswahrscheinlichkeit richtig bzw. falsch.

$$(A1a) \quad p(X_{vi} = 1 | \theta_v = g) = \pi_{ig} \quad \text{bzw.}$$

$$(A1b) \quad p(X_{vi} = 0 | \theta_v = g) = 1 - \pi_{ig}$$

π_{ig} bezeichnet die konstante Lösungswahrscheinlichkeit des Items i in der Klasse g . $1 - \pi_{ig}$ ist ihre Gegenwahrscheinlichkeit und entspricht der Wahrscheinlichkeit, das Item i falsch zu beantworten. Zusammenfassend ergibt sich daraus

$$(A1c) \quad p(X_{vi} = x | \theta_v = g) = \pi_{ig}^x (1 - \pi_{ig})^{1-x}$$

2. Alle Personen gehören nur einer Klasse an. Die Klassen des Modells sind damit disjunkt und exhaustiv.

3. Die Klassengröße, d. h. die Anzahl der Personen, die einer Klasse g angehören, ist unbekannt. Daher führt man für die Klassengröße den Wahrscheinlichkeitsparameter π_g ein.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällig ausgewählte Person der Klasse g angehört, beträgt damit

$$(A3a) \quad p(\theta_v = g) = \pi_g$$

Die Klassengrößen π_g addieren sich über die Anzahl aller Klassen G zu 1, es gilt

$$(A3b) \quad \sum_{g=1}^G \pi_g = 1$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Klassen G kein zu schätzender Parameter ist, sondern bei der Modellierung nach theoretischen Erwägungen vorgegeben wird (s.o.).

Aus diesen drei Annahmen lässt sich bereits die unbedingte Lösungswahrscheinlichkeit eines Items i formulieren. Damit lautet die Modellgleichung der latenten Klassenanalyse für eine feste Anzahl G von latenten Klassen

$$(M1) \quad p(X_{vi} = 1) = \sum_{g=1}^G \pi_g \pi_{ig}$$

Die unbedingte Lösungswahrscheinlichkeit eines Items i $p(X_{vi} = 1)$ ergibt sich als gewichtete Summe aller bedingten Lösungswahrscheinlichkeiten $\pi_g \pi_{ig}$ dieses Items in den G verschiedenen Klassen g .

4. Nimmt man weiterhin für den Test Itemhomogenität⁵ an, berechnet sich die unbedingte Wahrscheinlichkeit eines Antwortmusters (Patternwahrscheinlichkeit) genauso wie die unbedingte Lösungswahrscheinlichkeit eines Items, damit geht (M1) in

$$(A4) \quad p(\underline{x}) = \sum_{g=1}^G \pi_g p(\underline{x} | g)$$

über. $p(\underline{x} | g)$ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit des Antwortmusters \underline{x} in der Klasse g .

5. Nimmt man lokale stochastische Unabhängigkeit an, lassen sich die bedingten Patternwahrscheinlichkeiten $p(\underline{x} | g)$ auf die einzelnen Lösungswahrscheinlichkeiten der Items i zurückführen

$$(A5) \quad p(\underline{x} | g) = \prod_{i=1}^k \pi_{ig}^{x_i} (1 - \pi_{ig})^{1-x_i}$$

Durch Einsetzen von (A5) in (A4) erhält man die Modellgleichung des latenten Klassenmodells

$$(M2) \quad p(\underline{x}) = \sum_{g=1}^G \pi_g \prod_{i=1}^k \pi_{ig}^{x_i} (1 - \pi_{ig})^{1-x_i}$$

4.2.3 Modellgeltung

Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Modells wird beurteilt, ob das berechnete Modell zu den Daten passt. Diese Frage ist nicht absolut zu beantworten, sondern stets mit einem Vergleich zwischen mehreren Modellen verknüpft. Bei der Überprüfung der Modellgültigkeit sollte aber ein weiterer Aspekt berücksichtigt werden: Zum Erreichen der optimalen Passung des Modells sollte die Verhältnismäßigkeit der Mittel gewahrt bleiben, d. h. es ist zu beachten, mit welchem Aufwand an Modellparametern dieses Optimum erreicht wird. In dieser Arbeit kommen daher Modellgeltungskontrollen zum Einsatz, in denen Modelle paarweise anhand ihrer Likelihoodwerte miteinander verglichen werden können. Darauf beruhen die Modellvergleiche mithilfe von informationstheoretischen Maßen.

4.2.3.1 Die Likelihoodfunktion

Die Likelihoodfunktion L ist definiert als das Produkt der Patternwahrscheinlichkeiten $p(\underline{x}_v)$ über alle Personen N

$$(L1) \quad L = \prod_{v=1}^N p(\underline{x}_v)$$

Zur besseren Handhabung verwendet man die logarithmierten Werte⁶ der Likelihoodfunktion, die „Loglikelihoods“. Hier gilt: Je größer der Loglikelihood eines Modells ist, desto besser passt das Modell auf den Datensatz. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Loglikelihood generell bei ansteigender Zahl der zu schätzenden Parameter wächst. Eine Einklassenlösung hätte beispielsweise immer einen kleineren Loglikelihood als eine Zweiklassenlösung.

4.2.3.2 Informationstheoretische Maße

Es leuchtet unmittelbar ein, dass für die Überprüfung der Modellgültigkeit Kriterien gefunden werden müssen, die das Ansteigen der Loglikelihoods mit steigender Parameterzahl bei der Berechnung berücksichtigen. Diese Funktion erfüllen sogenannte Straffunktionen (penalty functions). Hierbei wird die Likelihoodfunktion mit der zu schätzenden Parameteranzahl in Beziehung gesetzt. Ein solches informationstheoretisches Kriterium, das zusätzlich noch den Stichprobenumfang berücksichtigt, ist das *Best Information Criterion* (BIC). Es berechnet sich nach folgender Gleichung

$$(L2) \quad \text{BIC} = -2\log L + (\log N)n_p$$

Nach dem BIC passt ein Modell umso besser auf die Daten, je kleiner der Wert ist. Ein weiterer Index, der in dieser Arbeit zur Beurteilung herangezogen wird, ist das *Consistent Akaikes Information Criterion* (CAIC). Das Modell passt analog zum BIC um so besser auf die Daten, je kleiner der CAIC ist.

Mit Hilfe des BIC und CAIC können Modelle miteinander verglichen werden, die in keiner hierarchischen Beziehung zueinander stehen, z. B. das Rasch-Modell mit einem 2-LC-Modell. Bei der Auswahl eines Modells anhand der informationstheoretischen Indices sollte jedoch auch die psychologische Plausibilität eines Modells berücksichtigt werden. Hier kann es durchaus vorkommen, dass einer nach BIC und CAIC beurteilten „zweitbesten“ Lösung der Vorzug zu geben ist.

4.2.4 Zuordnungswahrscheinlichkeiten

Des Weiteren wurden zur Abschätzung der Zuverlässigkeit einer latenten Klassenlösung die mittleren maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten der Klassen herangezogen. Aus den Modellannahmen der latenten Klassenanalyse lässt sich ableiten, dass jede Person jeder Klasse nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angehört. Damit erfolgt die Klassenzuordnung nicht manifest, sondern es werden nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Klassenzugehörigkeit einer Person gemacht. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Person mit dem Antwortmuster \underline{x} der Klasse g angehört, beträgt

$$(Z1) \quad p(g | \underline{x}) = \frac{\pi_g p(\underline{x} | g)}{\sum_{h=1}^G \pi_h p(\underline{x} | h)} \quad \text{bzw.}$$

$$(Z2) \quad p(g | \underline{x}) = \frac{\pi_g \prod_{i=1}^k \pi_{ig}^{x_i} (1 - \pi_{ig})^{1-x_i}}{\sum_{h=1}^G \pi_h \prod_{i=1}^k \pi_{ih}^{x_i} (1 - \pi_{ih})^{1-x_i}}$$

wenn (A5) in (Z1) eingesetzt wird⁷. Die Summe der Zuordnungswahrscheinlichkeiten ergibt für jede Person 1. Da eine Person einer Klasse angehören muss (s. Modellannahme 2), wird sie derjenigen Klasse zugeordnet, für die die Zuordnungswahrscheinlichkeit maximal ist.

Der Mittelwert dieser maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten einer Klasse kann analog zum Reliabilitätsmaß als Maß für die Messgenauigkeit des Tests angesehen werden. Diese Treffsicherheit zeigt an, mit welcher mittleren Wahrscheinlichkeit die Personen den Messwert (also die Klassennummer) tatsächlich haben, der ihnen bei der Modellierung zugewiesen wurde. Diese Treffsicherheiten sollten stets größer als 80% sein. Daher wurden zusätzlich zu

den Modellgeltungskontrollen stets die durchschnittlichen maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten der Klassen zur Absicherung des ausgewählten Modells berücksichtigt.

Die maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten werden für jede Versuchsperson von Winmira 2001 (Davies, 2001) berechnet, die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den anderen Klassen eines Modells dagegen nicht. Zusätzlich wurden daher alle Zuordnungswahrscheinlichkeiten der in dieser Arbeit behandelten Modelle für jede Versuchsperson nach Gleichung (Z2) manuell in Excel berechnet. Zur Kontrolle dieser Daten wurde ein Abgleich mit der maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeit „maxpi“ des Programms Winmira 2001 (Davies, 2001) durchgeführt. Bei diesem Abgleich mit der maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeit ergaben sich lediglich Rundungsfehler auf der dritten Dezimalstelle.

4.2.5 Veränderungsmessungen mit LCA

Im Folgenden werden Verfahrensweisen für die Analyse von Veränderungen in einem Vortest-Nachtest-Design mithilfe eines latenten Klassenmodells beschrieben.

4.2.5.1 Modellierung

Die Daten hinsichtlich des Lernerfolgs wurden in allen Studien zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, *vor* und *nach* der computergestützten Lernsitzung, erhoben. Die Fragebögen waren in jeder Studie zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) und zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) identisch. Die Itemantworten der Versuchspersonen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) werden so behandelt, als wären sie von anderen Personen hervorgebracht worden. Man erstellt also aus Vor- und Nachtest eine kombinierte Datenmatrix und berechnet für diesen Datensatz gemeinsame Modelle. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Klassen in Vor- und Nachtest identisch sind. Eine Veränderung vom Vor- zum Nachtest drückt sich dann in einem Wechsel der Versuchsperson von einer Klasse in eine andere Klasse aus.

4.2.5.2 Kreuztabellierungen

Die Veränderungen vom Vor- zum Nachtest werden mit Hilfe von Kreuztabellierungen protokolliert. Diese Methode ist als deskriptives Verfahren formal unter den interferenzstatistischen Auswertungsverfahren anzusiedeln, wird aber aufgrund der Verwendung im Zusammenhang mit den latenten Klassenanalysen hier dargestellt. Mithilfe solcher Kreuztabellen wird der Lernerfolg der Gesamtstichprobe und der einzelnen Experimentalgruppen analysiert und vergleichend gegenübergestellt. Dazu ist es notwendig, die in diesem Zusammenhang verwendeten Bezeichnungen und Begriffe im nächsten Abschnitt zu definieren.

Tabelle IV-9: Beispiel für eine Kreuztabelle, die die Wanderungsbewegungen zwischen den Klassen dokumentiert.

In den Zellen sind absolute Personenhäufigkeiten angegeben. Weitere Erläuterungen im Text.

		Messzeitpunkt T2 (Nachttest)			Gesamt
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	
Messzeitpunkt T1 (Vortest)	Klasse 1	S1	L1	L2	G1
	Klasse 2	V1	S2	L3	G2
	Klasse 3	V2	V3	S3	G3
	Gesamt	G4	G5	G6	G

4.2.5.3 Definitionen

Tabelle IV-9 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Kreuztabelle zur Analyse des Lernerfolgs. Zur Erläuterung wurde ein 3-Klassenmodell zugrunde gelegt, da dieses sowohl in der Studie 2 als auch in der Studie 3 als günstigstes Modell ermittelt wurde. Die Kreuztabelle zur Analyse des Lernerfolgs enthält als Zellenwerte absolute oder relative Personenhäufigkeiten. In den Zeilen sind die Häufigkeiten zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) eingetragen, in den Spalten die zum Messzeitpunkt T2 (Nachttest). Die Zellen G1-G3 sind die zeilenweisen Summen von bestimmten Personenhäufigkeiten: Die Zelle G1 fasst nämlich alle Personen zusammen, die sich zum Zeitpunkt T1 in der Klasse 1 befanden, entsprechendes gilt für die Zellen G2 und G3 zu den Klassen 2 und 3. Mit G wird die Summe der Zellen L1-L3, S1-S3, und V1-V3 bezeichnet. Sie entspricht der Größe der Gesamtstichprobe bzw. derjenigen einer Experimentalgruppe. G4-G6 sind die spaltenweisen Summen. Sie geben die Gesamtpersonenhäufigkeit der drei Klassen im Nachttest an. Diese Größe ist in den folgenden Analysen ohne Belang.

Im Folgenden wird die Vereinbarung getroffen, dass eine höhere Klassennummer ein „Mehr“ an Lernergebnis darstellt. Wie dieses „Mehr“ an Lernergebnis qualitativ oder quantitativ im Detail zu konkretisieren ist, ergibt sich aus den Itemprofilen der latenten Klassen und wird in den Studien 2 und 3 ausführlich dargestellt (s. VI 4.3.5 und VII 4.3.5). Nachfolgend sollen zunächst nur die aus dieser Konvention resultierenden Gruppen vorgestellt werden.

- Vorwissensgruppen

Die Zuordnung einer Person zu einer Klasse nach ihrem Vortestergebnis entspricht ihrem Vorwissensstand. Damit entsprechen die Zellen G1 und G2 zwei unterschiedlichen Vorwissensgruppen⁸. Nach obiger Vereinbarung verfügen Personen der Gruppe G1 über kein / wenig Vorwissen und die Personen der Gruppe G2 über ein durch die Itemprofile definiertes Vorwissen.

- Lerner

Lerner wechseln von einer niedrigeren in eine höhere Klasse. Personen lernen dann, wenn sie basierend auf ihrem Nachtestergebnis einer höheren Klasse zugeordnet werden als sie es nach ihrem Vortestergebnis wurden. Diese Personen sind in Tabelle IV-9 in den Zellen L1-L3, also oberhalb der Hauptdiagonalen, zu finden.

- Stagnierende

Personen in den Zellen der Hauptdiagonalen weisen nach der Definition „Lerner“ keinen offensichtlichen Lernerfolg auf, da sie ihre Klasse vom Vor- zum Nachtest nicht verlassen. Diese Personen befinden sich in der Tabelle IV-9 in den Zellen S1-S3.

- Verlerner

Personen die von einer höheren Klasse zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) in eine niedrigere Klasse zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) wechseln, weisen nach der Lernsituation ein schlechteres Lernergebnis auf als vorher. Diese Personen verlernen. Sie befinden sich in Tabelle IV-9 in den Zellen V1-V3.

4.2.5.4 Analyseschema zur Überprüfung des Lernerfolgs

Aus der Kreuztabelle lassen sich verschiedene Arten von Lernerfolg ableiten, wenn die oben erläuterten Zellen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Daraus ergeben sich relative Personenhäufigkeiten, die den Vorteil haben, dass auch unterschiedliche Experimentalgruppen miteinander verglichen werden können. Die Analysen des Lernerfolgs der Gesamtstichprobe und der einzelnen Experimentalgruppen basieren auf diesem gemeinsamen Schema. Im Folgenden werden die Kategorien des Lernerfolgs vorgestellt.

- *Lernerfolg insgesamt*

Zur Bestimmung des „Lernerfolg insgesamt“ werden die Personenhäufigkeiten der Lerner zusammengefasst (Tabelle IV-9, Zellen L1-L3) und auf die Stichprobengröße G bezogen. Es ergibt sich eine relative Personenhäufigkeit.

- *Erwerb von Wissen 1 ohne Vorwissen*

Personen, die von der Klasse 1 in die Klasse 2 wechseln (s. Tabelle IV-9, Zelle L1), erwerben ein spezifisches Wissen (Wissen 1), das durch die Itemprofile der latenten Klassen konkretisiert wird; „Erwerb von Wissen 1 ohne Vorwissen“ wird in relativer Personenhäufigkeit basierend auf der Stichprobengröße G1 angegeben. G1 ist die Stichprobe der Personen ohne Vorwissen für die Gesamtstichprobe bzw. eine Experimentalgruppe (s.o.).

- *Erwerb von Wissen 2 ohne Vorwissen*

Werden Personen nach ihrem Vortestergebnis in die Klasse 1 eingruppiert, verfügen sie über keine oder nur wenige Vorkenntnisse. Personen, die dann von dieser Klasse in die Klasse 3 wechseln (s. Tabelle IV-9, Zelle L2), erwerben ein durch die Itemprofile definiertes „Wissen 2“. „Erwerb von Wissen 2 ohne Vorwissen“ wird in relativer Personenhäufigkeit basierend auf der Stichprobengröße G1 für die Gesamtstichprobe bzw. die jeweilige Experimentalgruppe angegeben.

- *Erwerb von Wissen 2 mit Vorwissen*

Werden Personen nach ihrem Vortestergebnis in die Klasse 2 eingeordnet, verfügen sie über ein definiertes Vorwissen, das sich aus dem Itemprofil der Klasse ableiten lässt. Personen, die dann von der Klasse 2 in die Klasse 3 wechseln (s. Tabelle IV-9, Zelle L3), erweitern damit ihr Wissen von „Wissen 1“ auf „Wissen 2“. „Erwerb von Wissen 2 mit Vorwissen“ wird dann in relativer Personenhäufigkeit basierend auf der Stichprobengröße G2 angegeben.

Tabelle IV-10 fasst die Berechnung der relativen Personenhäufigkeiten in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs zusammen.

Tabelle IV-10: Kategorien des Lernerfolgs für die latente Klassenanalyse

Der Lernerfolg wird in relativen Personenhäufigkeiten angegeben. In der dritten Spalte sind die verwendeten Berechnungsformeln angegeben.

Art des Lernerfolgs	Angabe in	Berechnungsformel
Lernerfolg insgesamt	Rel. Personenhäufigkeit	$\frac{L1 + L2 + L3}{G}$
Erwerb von Wissen 1 ohne Vorwissen	Rel. Personenhäufigkeit	$\frac{L1}{G1}$
Erwerb von Wissen 2 ohne Vorwissen	Rel. Personenhäufigkeit	$\frac{L2}{G1}$
Erwerb von Wissen 2 mit Vorwissen	Rel. Personenhäufigkeit	$\frac{L3}{G2}$

V STUDIE 1 (BIOMEMBRANEN)

Für die erste Studie wurde die Thematik „Biomembranen“ ausgewählt, die für die Versuchspersonen eine Wiederholung aus dem ersten Halbjahr der 11. Jahrgangsstufe darstellt. Es wurde erstens empirisch überprüft, ob die gewählte didaktische Reduktion und das daraus resultierende Komplexitätsniveau der zu vermittelnden biologischen Lerninhalte im Computerprogramm prinzipiell der Jahrgangsstufe angemessen ist. Zweitens wurde untersucht, ob der prinzipielle Aufbau und die Struktur der Lernumgebung benutzerfreundlich und für die Versuchspersonen plausibel ist. Die Versuchspersonen hatten damit die Gelegenheit, sich mit der Erhebungsmethode und den Möglichkeiten der späteren Lernumgebungen vertraut zu machen. Entsprechend wurde in dieser Studie nur eine gemeinsame Version der Lernumgebung appliziert, die alle Elemente beinhaltet, die in den nachfolgenden Untersuchungen zu den einzelnen Treatments ausdifferenziert wurden. Darunter sind sowohl Text-Bild-Kombinationen als auch animierte Darstellungen in Kombination mit Text als auch Simulationen zu verstehen. Durch das Einüben der Bedienung sollte gewährleistet werden, dass alle Versuchspersonen etwa gleiche technische Voraussetzungen haben. Somit sollte gesichert sein, dass das Lernergebnis der künftigen Studien nicht durch das Fehlen von Routine im Umgang mit der Lernumgebung negativ beeinflusst wird. Die subjektiv eingeschätzten Computerkenntnisse wurden dennoch als Kontrollvariable mit erhoben (s. IX 6). Da in dieser Studie noch keine Ausdifferenzierung in die verschiedenen Experimentalgruppen erfolgte, wurden die Hypothesen (s. III 2) im Hinblick auf die Einflussfaktoren Vorwissen, Lernpräferenz und kognitive Belastung geprüft. Es wurde untersucht, ob für diese Einflussgrößen signifikante Haupteffekte nachzuweisen sind.

Im Abschnitt 1 dieses Kapitels werden die fachwissenschaftlichen Grundlagen des Themas erläutert. In Abschnitt 2 wird auf die didaktische Reduktion der vorgestellten fachlichen Inhalte und im Abschnitt 3 auf ihre Präsentation in den Lernumgebungen eingegangen. Im Abschnitt 0 werden die Ergebnisse dargestellt, die im Abschnitt 5 diskutiert werden.

1 STRUKTUR UND FUNKTION BIOLOGISCHER MEMBRANEN AUS FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE

Membranen grenzen Zellen gegen die Außenwelt ab oder trennen, sofern sie im Inneren der Zelle lokalisiert sind, verschiedene Kompartimente voneinander. Membranen verfügen über eine selektive Permeabilität, d. h. der Austausch zwischen den Kompartimenten bzw. zwischen der Zelle und ihrer Außenwelt wird manchen Substanzen ermöglicht, anderen dagegen nicht. Diese Eigenschaft und die damit einhergehende Kontrollfunktion der biologischen Membran ist von zentraler Bedeutung für die Regulation aller stoffwechselphysiologischen Prozesse sowie für die inter- und intrazelluläre Kommunikation. Im Folgenden sollen daher die Prinzipien des Membrantransports dargestellt werden. Dazu wird zunächst der Aufbau einer biologischen Membran exemplarisch erläutert.

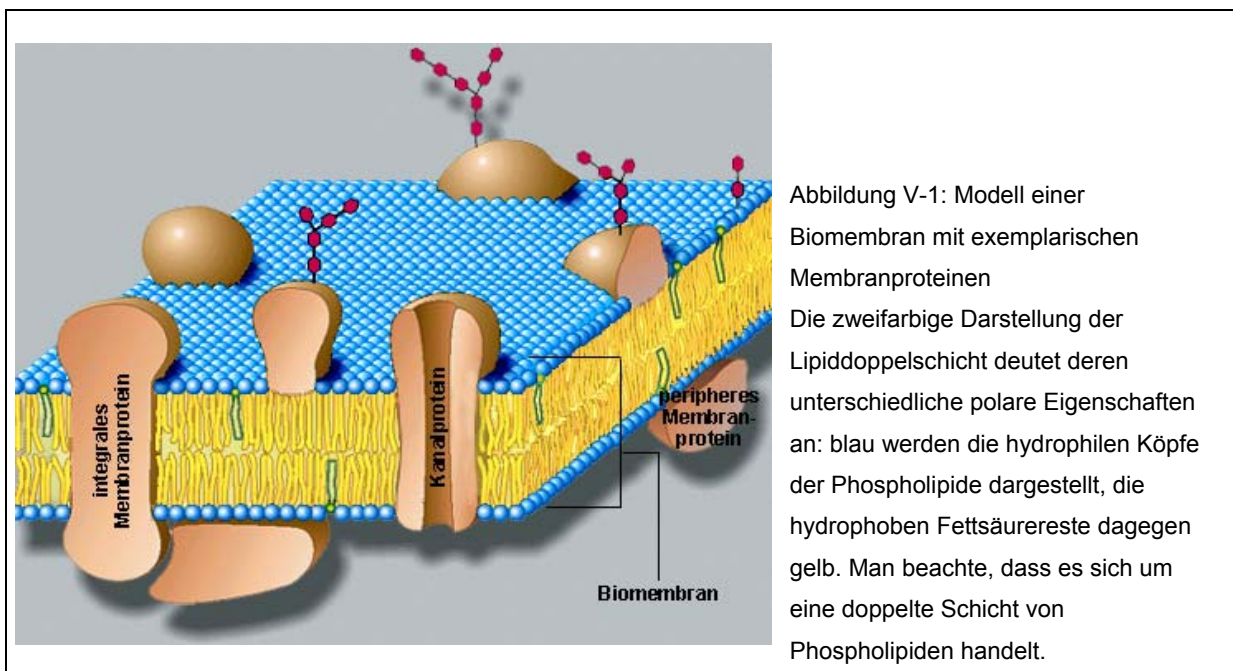
1.1 Aufbau biologischer Membranen

Hauptbestandteile von Membranen sind Lipide und Proteine, während Kohlenhydrate als Bausteine eine eher untergeordnete Rolle spielen. Unter Lipiden werden Fette und fettähnliche Substanzen zusammengefasst. Chemisch betrachtet sind Fette Ester des dreiwertigen Alkohols Glycerin und langkettiger Fettsäuren. Durch die unpolaren Eigenschaften der langkettigen Fettsäuren wird ihr Verhalten gegenüber Lösungsmitteln bestimmt: sie sind wasserunlöslich, wie die meisten Vertreter der Lipide. Die fettähnlichen Substanzen zeichnen sich durch eine große Heterogenität aus. Zu ihnen sind auch die Phospholipide zu rechnen, die am häufigsten vorkommende Lipidgruppe in biologischen Membranen. Im Gegensatz zu anderen Lipiden verfügen Phospholipide über amphiphile Eigenschaften: sie bestehen aus einem unpolaren Schwanz und einem polaren Kopf. Dieser polare Kopf entsteht formal dadurch, dass ein endständiger Fettsäurerest in einem Neutralfett durch einen Phosphorsäureester ersetzt wird. Diese Ambivalenz macht Phospholipide zu ausgezeichneten Membranbausteinen: der polare Teil befähigt sie zur Wechselwirkung mit Wassermolekülen und mit Proteinen, sofern diese selbst über eine hinreichende Polarität verfügen.

Biomembranen sind aus einer Doppelschicht von amphiphilen Lipiden aufgebaut, wobei die hydrophoben Fettsäurereste einander zugewandt und durch hydrophobe Wechselwirkungen fixiert sind, während die polaren Köpfe die beiden hydrophilen Außenflächen der Membran bilden. Diese Lipiddoppelschicht wird im Wesentlichen durch zwei Merkmale charakterisiert:

Flexibilität und Fluidität. Die Fluidität ermöglicht u.a. die laterale Beweglichkeit von Proteinen und anderen Komponenten in der Membran, sie ist somit ein entscheidendes Merkmal für die Funktionalität der Membran.

Der Anteil der Proteine an der biologischen Membran entspricht im Allgemeinen etwa dem der Lipide. Er kann aber bei Funktionsmembranen wie der inneren Mitochondrienmembran oder der Thylakoidmembran bis zu 80% ausmachen. Man unterscheidet periphere Membranproteine, die locker mit der Lipiddoppelschicht assoziiert sind, von den integralen Membranproteinen, die tief in den hydrophoben Teil der Lipiddoppelschicht eingelassen sind oder die Membran komplett durchspannen. Transportproteine wie Ionenpumpen, Wasser- und Ionenkanäle, die für die Funktionen der Membran unerlässlich sind, sind typische Beispiele für integrale Membranproteine.



1.2 Transportvorgänge

Die biologische Membran wurde eingangs durch ihre Eigenschaft „selektive Permeabilität“ charakterisiert. Die Funktion der Abgrenzung und Kontrolle ist einerseits in der Sperrwirkung der amphiphilen Bauweise der Lipiddoppelschicht für hydrophile Moleküle und Ionen begründet, andererseits in der hohen Spezifität der integralen Membranproteine für ihre zu transportierenden Moleküle. Mit einem unregelmäßigen Durchtritt von Substanzen durch die Membranproteine wären die hoch komplexen Stoffwechsellvorgänge in der Zelle nicht zu organisieren. Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, was die Richtung des Membrantransports bestimmt und welche Triebkräfte hierfür verantwortlich sind.

1.2.1 Diffusion

Moleküle einer Flüssigkeit oder eines Gases besitzen in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlich große Bewegungsenergie. Diese Energie bewirkt, dass sich die Teilchen in einem zur Verfügung stehenden Raum gleichmäßig verteilen. Diesen Vorgang bezeichnet man als Diffusion. Er hält an, solange für die Substanz ein Konzentrationsgefälle besteht.

1.2.2 Passiver Transport

Unter passivem Transport versteht man die Diffusion von Teilchen durch eine Membran in Richtung ihres Konzentrationsgradienten. Dieser Vorgang dauert solange an, bis die gleichmäßige Verteilung der Teilchen und damit der Konzentrationsausgleich zwischen den beiden Kompartimenten erreicht ist. Bei Konzentrationsausgleich stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht an der Membran ein: pro Zeiteinheit diffundieren jetzt gleich viele Teilchen vom ersten ins zweite Kompartiment wie umgekehrt. „Passiv“ wird der Transport deshalb genannt, weil die Zelle keine Energie dafür aufwenden muss. Der Konzentrationsgradient allein stellt die Triebkraft für den Transport dar. Die Diffusion von Teilchen durch biologische Membranen wird durch Transportmoleküle (Carrier) und Kanalproteine (Ionenkanäle) ermöglicht. Kanalproteine sind hochspezifisch für ihre Substrate und gewährleisten den Durchgang von Ionen und polaren Molekülen, die sonst durch die unpolaren Eigenschaften der Lipiddoppelschicht zurückgehalten würden.

1.2.3 Aktiver Transport

Bei diesem Transportvorgang werden Teilchen durch die Membran vom Bereich niedriger Konzentration zum Bereich hoher Konzentration befördert. Dazu ist Energie notwendig, die von der Zelle bereitgestellt werden muss. Wegen des Energieaufwandes wird dieser Vorgang als „aktiver Transport“ bezeichnet. Man unterscheidet beim aktiven Transport primär und sekundär aktiven Transport in Abhängigkeit davon, wie die für den Transport notwendige Energie zur Verfügung gestellt wird.

1.2.3.1 Primär aktiver Transport

Als primär aktiven Transport bezeichnet man einen gegen das Konzentrationsgefälle gerichteten Transport, der durch die Energie einer chemischen oder photochemischen Reaktion angetrieben wird. Ein prominentes Beispiel für primär aktiven Transport ist der von Natrium- und Kaliumionen durch das Transportprotein Natrium-Kalium-Pumpe unter ATP-Spaltung. Hierbei werden jeweils gegen ihr Konzentrationsgefälle 3 Natriumionen aus der Zelle heraus und 2 Kaliumionen in die Zelle hinein transportiert. Die hierzu notwendige Energie stammt aus der Spaltung von ATP in ADP und anorganisches Phosphat.

Ein weiteres Beispiel ist der Transport von Protonen gegen ihren Konzentrationsgradienten, bei dem die beim Elektronentransport der Atmungskette oder der Fotosynthese freiwerdende Energie genutzt wird. Der Transport von Protonen gegen ihren Gradienten kann aber auch durch die Reaktionsenergie der ATP-Spaltung angetrieben werden. Erforderlich hierzu sind Transportproteine, sogenannte H^+ -ATPasen oder Protonenpumpen, die ATP in ADP und anorganisches Phosphat spalten können. Auf diese Weise werden Protonengradienten erzeugt bzw. erhalten. Protonengradienten speichern Energie für eine andere Form des Transports, den sekundär aktiven Transport.

1.2.3.2 Sekundär aktiver Transport

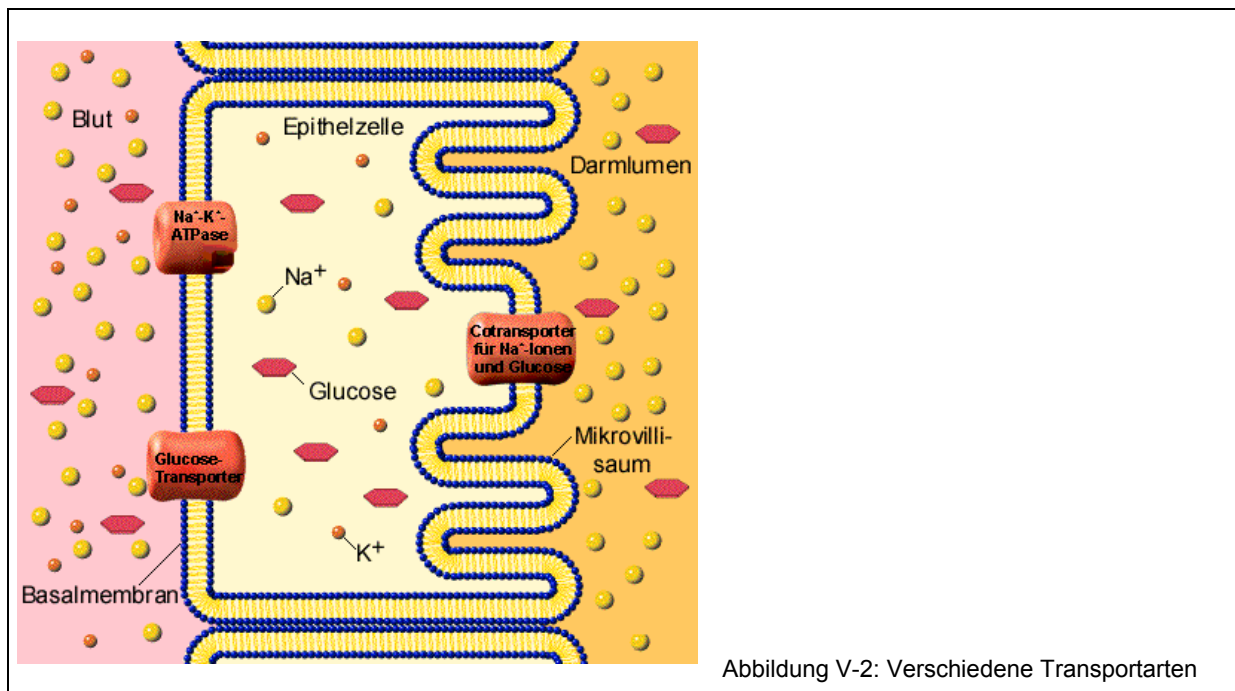
Bei einem sekundär aktiven Transport ist die einzige Triebkraft über eine Membran ein elektrochemisches Potential. Ionen, z. B. Protonen oder Natriumionen, für die ein Konzentrationsgradient besteht oder die primär aktiv über eine Membran transportiert worden sind, können beim passiven Zurückdiffundieren entlang ihres Gradienten Energie freisetzen. Diese Energie kann dazu genutzt werden, andere Teilchen gegen ihren Konzentrationsgradienten durch die Membran zu befördern.

1.2.4 Beispiel für das Zusammenspiel verschiedener Transportarten:

Glucosetransport im Darm

Der Cotransporter für Natriumionen und Glucose ist ein Transportsystem des Darmepithels (s. Abbildung V-2). Natriumionen und Glucose werden dabei vom Darmlumen (rechts) in die Epithelzelle befördert. Der Gradient der Natriumionen stellt die Triebkraft für den Glucosetransport dar (sekundär aktiver Transport). Dadurch, dass die Natriumionen am basalen Ende der Epithelzelle durch die Na^+K^+ -ATPase wieder aus der Zelle ins Blut befördert werden (primär aktiver Transport), wird der Gradient für Natriumionen zwischen Darmlumen und Epithelzelle aufrechterhalten. Durch den sekundär aktiven Transport wird Glucose in der

Epithelzelle angereichert und ein Konzentrationsgradient zwischen Epithelzelle und Blut aufgebaut. Die Glucose diffundiert entlang ihres Konzentrationsgradienten ins Blut weiter (passiver Transport).



2 STRUKTUR UND FUNKTION BIOLOGISCHER MEMBRANEN AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE

Für die Versuchspersonen stellte das Thema der ersten Studie „Struktur und Funktion biologischer Membranen“ eine weitgehende Wiederholung aus dem ersten Schulhalbjahr der 11. Jahrgangsstufe dar. Wiederholt wurden der allgemeine Aufbau und die Eigenschaften biologischer Membranen. Als wichtige Prinzipien des Membrantransports wurden Diffusion und passiver Transport thematisiert. Weiterhin wurden die Unterschiede bei primär und sekundär aktivem Transport schematisch dargestellt und erläutert. Für die textliche Erläuterung und die bildliche Darstellung der beschriebenen Inhalte wurde ein mittleres Komplexitätsniveau gewählt.

3 MATERIAL UND METHODE

3.1 Die Lernumgebung der Studie 1 (Biomembranen)

Die Lernumgebung „Diffusion, Osmose, Transportprozesse in Biomembranen“ der Studie 1 enthält alle multimedialen Elemente, die später in den Studien 2 und 3 kennzeichnend für die unterschiedlichen Experimentalgruppen sind. Dieses sind Text-Bild-Kombination, animierte Darstellung und Simulation. Dazu wurde die Lernumgebung „Diffusion, Osmose, Transportprozesse in Biomembranen“, die vorwiegend aus eigens für Studie 1 programmierten Seiten besteht, um zwei Simulationen aus der Mediothek Biologie 1, Zelluläre Phänomene (1999) ergänzt. So wechseln Text-Bild-Kombinationen mit animierten Darstellungen ab. Die Einstellung von Parametern konnte am Beispiel einer Simulation zur Diffusion und Osmose aus der Mediothek Biologie 1, Zelluläre Phänomene (1999) vorgenommen werden.


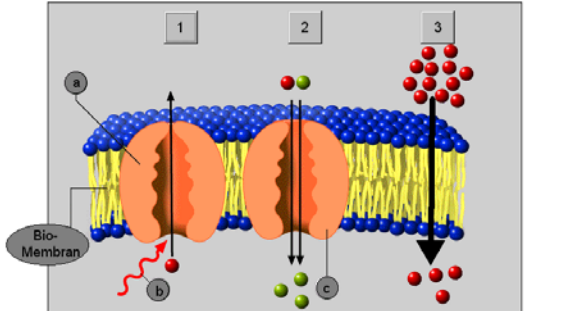

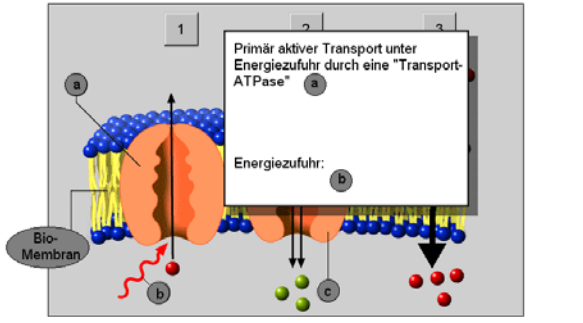


Gliederung der Lernumgebung

- Abschnitt 1:
Definitionen von Diffusion und Osmose in Verbindung mit einer Lernkontrollfrage
- Abschnitt 2:
Prinzipieller Aufbau von Biomembranen; 4 Lernkontrollfragen, 2 Multiple-Choice-Quizze und weitere 3 Lernkontrollfragen mit Feedbackfunktion
- Abschnitt 3:
Diffusion und Osmose im Modell mit Multiple-Choice-Quiz
- Abschnitt 4:
Passive Transportsysteme mit einer Lernkontrollfrage mit Feedbackfunktion
- Abschnitt 5:
Aktive Transportsysteme mit einer Lernkontrollfrage mit Feedbackfunktion. Die Abbildung V-3 bis Abbildung V-6 zeigen für die Lernsequenz zum aktiven Transport typische Text-Bild-Kombinationen der Lernsoftware.

- Abschnitt 6:

Zusatzmaterial; die im obligatorischen Teil der Lernsoftware verallgemeinert gezeigten Inhalte wie passiver Transport durch ein Kanalprotein, primär und sekundär aktiver Transport wurden hier am Beispiel des Glucosetransports im Darm (Ernst Klett Verlag, 1999) konkretisiert.

Erläuterungen zum Abschnitt 5 in der Lernumgebung

<p>Stoffe, die normalerweise die Membran nicht passieren können, werden durch sogenannte Transportsysteme durch die Membran geschleust.</p> <p>Es gibt den passiven und aktiven Transport.</p> <p>Die folgende Abbildung zeigt nun die aktiven Transportsysteme.</p> 	 
<p>Abbildung V-3: Einleitende Textseite</p>	<p>Abbildung V-4: Stehendes Bild zu den aktiven Transportprozessen</p>
 	<p>Notieren Sie die beiden Transportsysteme für den aktiven Transport.</p> <p>Schreiben Sie die Antwort in dieses Feld:</p> <div style="border: 1px solid black; height: 60px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: right;">Lösung</p> 
<p>Abbildung V-5: Erläuterungstext zum stehenden Bild Der Text kann über einen dafür vorgesehenen Button (s. Buttons 1, 2, und 3) aufgerufen werden.</p>	<p>Abbildung V-6: Lernkontrollfrage zum aktiven Transport Die Versuchspersonen werden aufgefordert, ihr erworbenes Wissen zu rekapitulieren. Ein Feedback zur Lösung ist über den Button „Lösung“ abrufbar.</p>

3.2 Stichprobe und Experimentalgruppe

An dieser ersten Datenerhebung waren insgesamt 185 Schülerinnen und Schüler der teilnehmenden Kurse aus den Gymnasien und Gesamtschulen beteiligt. Eine Differenzierung in die Experimentalgruppen wurde erst ab der Studie 2 vorgenommen. Bei dieser Studie wurde das vorgestellte Lernprogramm von allen Teilnehmern bearbeitet; die Bearbeitung erfolgte z.T. kooperativ mit maximal 2 Personen an einem Arbeitsplatz (s. IV 3)

3.3 Die Erhebungsinstrumente

Wie bereits eingangs bemerkt, wurde die Studie 1 zur Überprüfung und Evaluation der bei den Studien 2 und 3 einzusetzenden Instrumente genutzt. Dieses gilt gleichermaßen für die Fragebögen, deren Abschnitte zur Erfassung kognitiver und motivationaler Kontrollvariablen im Anschluss an die Studie 1 modifiziert wurden.

3.3.1 Vortest

- Computerkenntnisse

Zur Messung der kognitiven Kontrollvariable „Computerkenntnisse“ wurden zwei Skalen eingesetzt, die einerseits das Wissen über Computer (4 Items, Cronbachs Alpha = .80) und andererseits das Interesse an Computern (4 Items, Alpha = .88) erfassten.

- Lernpräferenz

Die Items zur Erfassung der kognitiven Kontrollvariablen „verbale Lernpräferenz“ und „visuelle Lernpräferenz“ wurden einer gemeinsamen Faktorenanalyse unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergibt vier Faktoren, die insgesamt 63,2% (Faktor 1: 24,0%; Faktor 2: 20,5%; Faktor 3: 9,6%; Faktor 4: 9,0%) der Gesamtvarianz erklärten. Während die beiden Faktoren zur Messung der verbalen Lernpräferenz identisch mit denen bei Paivio und Harshman (1983) sind, ergaben sich bei den Items zu den visuellen Gewohnheiten und Fähigkeiten abweichende Faktoren. Tabelle V-1 zeigt die rotierte Ladungsmatrix der Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle V-1: Rotierte Komponentenmatrix der Items zu verbalen und visuellen Gewohnheiten und Fähigkeiten

		Hauptkomponente			
Skala	Item	1	2	3	4
guter sprachlicher Ausdruck	verb4 Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	0,78			
	verb3 Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	0,77			
	verb6 Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	0,75			
	verb5 Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	0,66			
gewöhnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen	vis5 Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.		0,80		
	vis2 Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken		0,73		
	vis6 Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor		0,72		
	vis1 Ich denke oft in Bildern.		0,58		
Leseschwierigkeiten	verb1 Ich lese sehr langsam.			0,83	
	verb2 Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.			0,80	
Ohne Kategorie	vis4 Ich finde es schwierig, mir etwas bildlich vorzustellen.				0,77
	vis3 Wenn ich mich an eine Szene erinnere, denke ich eher in Worten als in Bildern.				- 0,65

Die verbale Lernpräferenz wird nach dieser Analyse in den folgenden Studien mit einer Skala gemessen, deren Items den Subskalen „guter sprachlicher Ausdruck“ (4 Items, Alpha = 0,75) und „selbstberichtete Leseschwierigkeiten“ (2 Items, Alpha = 0,64) des Fragebogens von Paivio und Harshman (1983) entspricht. Die Reliabilität der Gesamtskala (6 Items, Alpha = 0,74) ist damit zufriedenstellend. Die Items, die in unseren Studien zur Erfassung der visuellen Gewohnheiten und Fähigkeiten verwendet werden sollten, wurden ebenfalls aus zwei Subskalen des Fragebogens von Paivio und Harshman abgeleitet. Die erste Subskala diente bei Paivio und Harshman zur Erfassung der „gewöhnheitsmäßigen Benutzung von bildlichen Vorstellungen im allgemeinen“ (4 Items), während die zweite bei ihnen spezieller das „Verwenden von visuellen Vorstellungen beim Problemlösen“ (2 Items) diente. Diese

beiden Subskalen konnten nach der obigen Analyse in unseren Studien nicht beibehalten werden. Die vier Items der zweiten Hauptkomponente erfassten insgesamt die gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen. Daraus leitete sich für die Studien 2 und 3 eine Skala mit vier Items ab (Alpha = 0,74), mit der die visuellen Lernpräferenz gemessen wurde. Die Items der vierten Hauptkomponente (ohne Kategorie) konnten dagegen in unseren Studien nicht genutzt werden, da sie kein sinnvoll interpretierbares Konstrukt abbildeten. Darüber hinaus wies diese Skala eine ausgesprochen schlechte Reliabilität auf. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die aus dem Amerikanischen übernommenen Items durch die Übersetzung ins Deutsche eine etwas andere Bedeutung gewinnen oder auch für deutsche Schüler nicht im gleichen Maße zutreffend sind.

- Themenspezifisches Wissen / Fachkenntnisse

Die themenspezifischen (Vor-)Kenntnisse zur den biologischen Inhalten wurden zu Beginn der Studie 1 „Transportprozesse an Biomembranen“ durch insgesamt zehn Items (Alpha = 0,43) erhoben. Davon überprüften sechs Items bereits vorhandenes Faktenwissen (s. IX 6.3, Items 1-6). Diese Aufgaben waren im Multiple-Choice-Format gestaltet und jeweils mit vier vorgegebenen Antworten zum Ankreuzen versehen, von denen maximal zwei richtig sein können. Mit weiteren vier Items wurde das Verständnis des Themas anhand von Transferleistungen erhoben (s. IX 6.3, Items 7-10). Diese Items waren so konstruiert, dass sie eine Anwendung des Wissen und darüber hinaus Schlussfolgerungen erforderten. Die Verständnisitems wurden im Gegensatz zu den Faktenwissenitems mit offenen Antwortformaten versehen. Tabelle V-2 fasst die deskriptiven Statistiken und die Reliabilitäten der Skalen für die im Vortest gemessenen Variablen zusammen.

Tabelle V-2: Deskriptive Statistiken für die Skalen des Vortests in Studie 1

Variable	Skala	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
Computerkenntnisse	Computerinteresse	4	7,21	3,14	0,88
	Computerwissen	4	4,32	2,98	0,80
verbale Lernpräferenz	guter sprachlicher Ausdruck	4	7,66	2,51	0,75
	Lesekompetenz	2	4,16	1,50	0,64
visuelle Lernpräferenz	gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen	4	6,13	2,30	0,74
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	10	17,52	3,19	0,43

3.3.2 Nachtest

Die Items der kognitiven und motivationalen Kontrollskalen wurden zur Dimensionsreduktion einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergab drei Faktoren, die insgesamt 53,3% (Faktor 1: 24,2%; Faktor 2: 21,0%; Faktor 3: 8,0%) der Gesamtvarianz erklärten. Tabelle V-3 zeigt die rotierte Ladungsmatrix der Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle V-3: Rotierte Komponentenmatrix der Items zu den Skalen *Kognitive Belastung*, *Interesse* und *Aufmerksamkeit*

Skala	Item	Komponente			
		1	2	3	
Kognitive Belastung	kb_2	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	0,74		
	kb_6	Fühlten Sie sich durch die Komplexität (Auswahlmöglichkeiten, komplizierte Inhalte) des Lernprogramms geistig überlastet?	0,71		
	kb_1	War das Lernprogramm für Sie eher zu leicht oder zu schwer?	0,71		
	kb_5	Fühlten Sie sich durch die Informationsfülle des Lernprogramms geistig überlastet?	0,64		
	kb_3	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen?	0,62		
	kb_4	Wie sehr mussten Sie sich bemühen um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?	0,60		
	kb_7	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot?	0,59		
	kb_8	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?	0,56		
Interesse	m_1	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?		0,84	
	m_2	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm?		0,79	
	m_5	Wie sehr würden Sie das Lernen mit dem Lernprogramm Ihren Freunden empfehlen?		0,77	
	m_4	Wie würde es Ihnen gefallen mit dem Lernprogramm in Ihrer Freizeit zu lernen?		0,70	
	m_3	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie?		0,57	
Aufmerksamkeit	a_2	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?			0,76
	a_1	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren?			0,61

- Kognitive Belastung

Dem Ergebnis der Faktorenanalyse folgend wird die Variable *Kognitive Belastung* nicht weiter nach den unter IV 2.2.2 aufgeführten Subskalen differenziert sondern mit der hier bestätigten Gesamtskala gemessen. Die Skala zur Erfassung der kognitiven Belastung in dieser und den folgenden beiden Studien besteht damit aus acht Items (Alpha = 0,80).

- Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit und die Konzentration während des Lernvorgangs wird als motivationale Kontrollvariable in den beiden folgenden Studien weiterhin erhoben. Die Skala hierzu besteht aus zwei Items (Alpha = 0,46). Allerdings wird ihr wegen der suboptimalen Reliabilität keine weitere Bedeutung bei der Auswertung und den berichteten Ergebnissen der folgenden Untersuchungen beigemessen.

- Interesse

Die Skala zur Messung der motivationalen Kontrollvariable *Interesse* hatte einen heterogenen Charakter und bezog sich sowohl auf die biologischen Inhalte („task value“) als auch auf die Gestaltung der Lernumgebung („tool value“). Dennoch wies die Skala eine gute Reliabilität auf (Alpha = 0,81) und konnte ohne weitere Veränderungen bei den nachfolgenden Untersuchungen eingesetzt werden.

- Themenspezifisches Wissen / Fachkenntnisse

Zur Messung des Lernerfolgs nach der Bearbeitung der Lernprogramme wurde den Versuchspersonen derselbe Fragebogen wie zur Messung der themenspezifischen Vorkenntnisse einer Studie vorgelegt (s. IX 6). Der Nachtest überprüfte damit wie der Vortest anhand von sechs Items das Faktenwissen der Versuchspersonen und des Weiteren mit vier Items ihr Verständnis für die Vorgänge an biologischen Membranen im Allgemeinen. Die Reliabilität des Wissenstest ist mit Alpha = 0,62 im Nachtest zwar deutlich größer als im Vortest, aber immer noch nicht sonderlich hoch.

Tabelle V-4 bietet einen Überblick der deskriptiven Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen der im Nachtest zu messenden Variablen zusammen.

Tabelle V-4: Deskriptive Statistiken für die Skalen des Nachtests in Studie 1

Variable	Skala	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
	Kognitive Belastung	8	11,80	4,39	0,80
	Aufmerksamkeit	2	4,49	1,56	0,46
	Interesse	5	9,57	4,37	0,81
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	10	23,97	4,10	0,62

4 ERGEBNISSE

Da in dieser Untersuchung keine verschiedenen Experimentalgruppen zu vergleichen waren, wurden die Forschungshypothesen im Hinblick auf die Haupteffekte der Einflussgrößen Vorwissen, Lernpräferenz und kognitive Belastung auf signifikante Unterschiede untersucht. In den folgenden Abschnitten wird erst der Lernerfolg differenziert nach Faktenwissen und Verständnis deskriptiv analysiert. Im Anschluss daran wird der Einfluss des Vorwissens und der Lernpräferenz auf den Lernerfolg berichtet. Abschließend soll auf die Auswirkung der kognitiven Belastung beim computergestützten Lernen fokussiert werden. Alle Datenanalysen beruhen auf den methodischen Verfahren der klassischen Testtheorie. Probabilistische Testmodelle wurden auf die Daten dieser Studie nicht angewendet.

4.1 Die Wirkung der Lernumgebung auf Faktenwissen und Verständnis der Vorgänge an Biomembranen

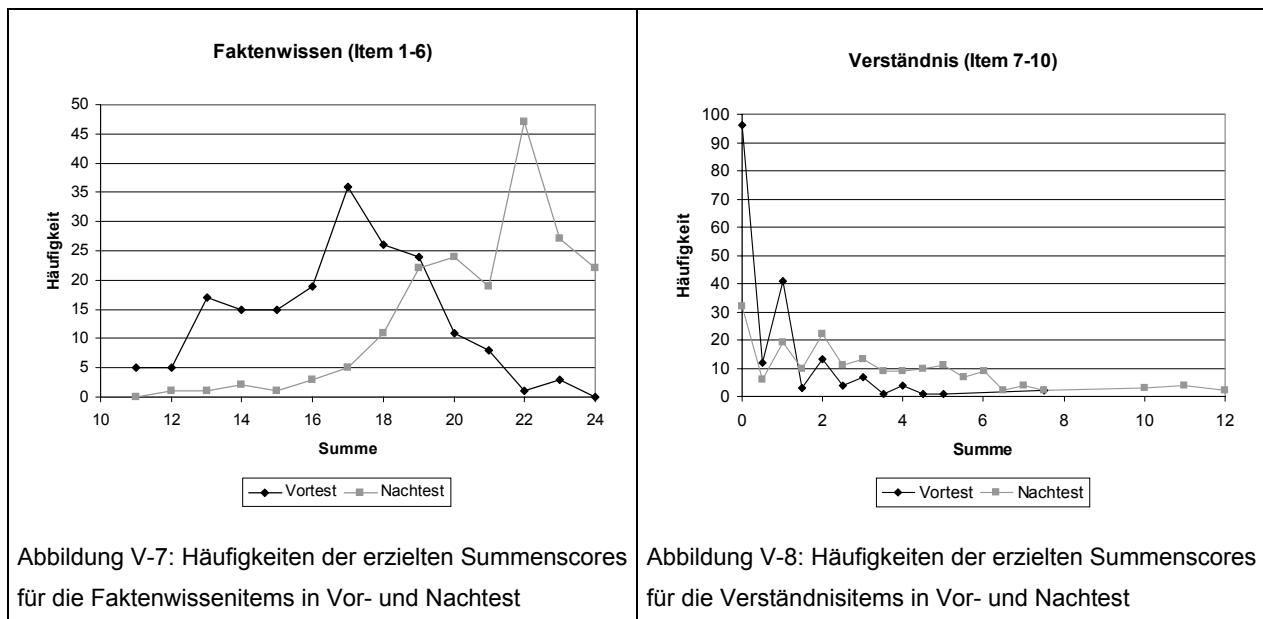
4.1.1 Häufigkeiten der Summenscores in Kategorien Faktenwissen und Verständnis

Im Faktenwissen konnten 0-24 Punkte⁹ erzielt werden. Die Summenscores für das Faktenwissen im Vortest sind im Bereich von 11 bis 24 Punkten normalverteilt. Sie erreichen die maximalen Häufigkeiten im mittleren Bereich der auftretenden Summenscores (s. Tabelle V-5 und Abbildung V-7). Die Faktenwissenitems hatten damit ein angemessenes Schwierigkeitsniveau im Vortest. Im Nachtest werden bei den Faktenwissenitems von über 50% der Versuchspersonen Summenscores zwischen 22 und 24 Punkten erreicht; durch den Lernzuwachs in der Kategorie Faktenwissen ist damit ein Deckeneffekt im Nachtest festzustellen (s. Tabelle V-5 und Abbildung V-7). Ein anderes Bild vermitteln die Häufigkeitsverteilungen der Summenscores in Vor- und Nachtest für die Verständnisitems. Bei der Beantwortung der 4 Items dieser Kategorie konnten die Versuchspersonen maximal 15 Punkte insgesamt erreichen. Tabelle V-5 und Abbildung V-8 zeigen, dass 99% der Stichprobe lediglich 5 von den maximal erreichbaren Punkten im Vortest erhalten. Damit waren die Verständnisitems für den Vortest offenbar zu anspruchsvoll. Nach der Lernphase haben sich die Verständnisseleistungen offenbar nur geringfügig verbessert: im Nachtest

erreichen immer noch 82% der Stichprobe lediglich ein Drittel der maximal erreichbaren Punktzahl (5 von 15 Punkten).

Tabelle V-5: Häufigkeiten der erzielten Punktesummen differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Faktenwissen (Item 1-6)			Verständnis (Item 7-10)		
Summe	Häufigkeit Vortest	Häufigkeit Nachtest	Summe	Häufigkeit Vortest	Häufigkeit Nachtest
11	5	0	0	96	32
12	5	1	0,5	12	6
13	17	1	1	41	19
14	15	2	1,5	3	10
15	15	1	2	13	22
16	19	3	2,5	4	11
17	36	5	3	7	13
18	26	11	3,5	1	9
19	24	22	4	4	9
20	11	24	4,5	1	10
21	8	19	5	1	11
22	1	47	5,5	0	7
23	3	27	6	0	9
24	0	22	6,5	0	2
			7	0	4
			7,5	2	2
			10	0	3
			11	0	4
			12	0	2



4.1.2 Häufigkeiten der Lernzuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis

Als Maß für den Lernzuwachs in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis werden hier und in den beiden folgenden Studien die Differenzen der Summenscores aus Nach- und Vortest betrachtet (s. IV 4.1.2). Ein negativer Lernzuwachs ergibt sich somit, wenn im Nachtest ein schlechteres Ergebnis erzielt wurde als im Vortest. Beim Lernzuwachs in der Kategorie Faktenwissen ist die Stichprobe ungefähr zweigeteilt: die eine Hälfte der Versuchspersonen erreicht Differenzen zwischen Nach- und Vortest, die kleiner oder gleich 4 Punkten ist, während die andere Hälfte Zuwächse von 5 oder mehr Punkten verzeichnet. Der Zuwachs von 4 Punkten entspricht beim Faktenwissen aufgrund des Bewertungssystems einem zusätzlich gelöstem Item im Nachtest; dies wird von ca. 60% der Stichprobe erreicht. Beim Verständnis fällt der Lernzuwachs deutlich geringer aus als beim Faktenwissen: über 25% weisen keinen Lernerfolg auf (Differenz ist kleiner oder gleich 0 Punkte). ca. 50% der Stichprobe können sich geringfügig verbessern (in diesem Fall liegt der Zuwachs zwischen 0,5 und 3,5 Punkten). Die übrigen 25% weisen entsprechend einen Zuwachs von über 4 Punkten auf. Tabelle V-6 zeigt die Ergebnisse im Einzelnen. In der Abbildung V-9 sind diese Resultate grafisch dargestellt.

Tabelle V-6: Zuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) für die Kategorien
Faktenwissen und Verständnis

Score	Faktenwissen	Verständnis
-4	4	0
-3,5	0	1
-3	2	0
-2,5	0	1
-2	1	1
-1,5	0	1
-1	3	5
-0,5	0	1
0	7	38
0,5	0	9
1	14	17
1,5	0	13
2	21	17
2,5	0	16
3	23	12
3,5	0	8

Score	Faktenwissen	Verständnis
4	20	16
4,5	0	4
5	28	6
5,5	0	7
6	17	4
6,5	0	0
7	16	0
7,5	0	1
8	15	1
8,5	0	1
9	7	3
9,5	0	1
10	3	1
10,5	0	0
11	4	0

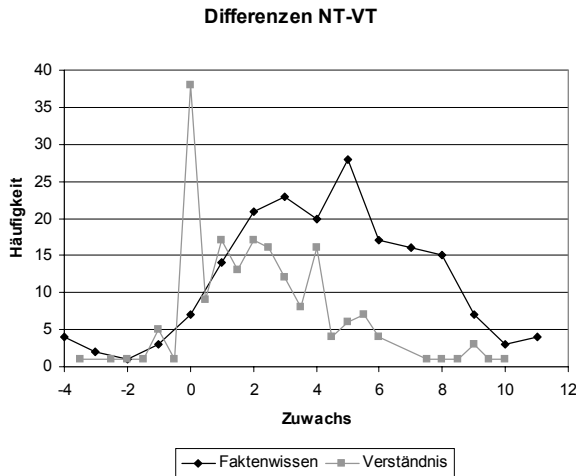


Abbildung V-9: Häufigkeiten der Zuwächse (Differenzen der Summscores aus Nachtest und Vortest) in Faktenwissen und Verständnis

4.1.3 Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachtestergebnisse und die Lernzuwächse

Die deskriptiven Statistiken verdeutlichen noch einmal die bisher gemachten Aussagen zum Lernerfolg in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis. Während beim Faktenwissen im Vortest ein Mittelwert von 16,70 Punkten erreicht wird, der ungefähr in der Mitte des Intervalls zwischen erreichtem Punkteminimum und -maximum liegt, und damit die Angemessenheit der Items widerspiegelt, wird in der Kategorie Verständnis lediglich ein Mittelwert von 0,82 Punkten erzielt. Für die Nachtestergebnisse im Faktenwissen ist bei einem Mittelwert von 20,97 Punkten mit einer Standardabweichung von 2,33 Punkten ein Deckeneffekt anzunehmen und damit zu diskutieren, ob sich die Lernerfolge aus diesem Grund nicht weiter steigern ließen. Beim Verständnis erzielen die Versuchspersonen jedoch nur 3,04 Punkte im Mittelwert. Im Faktenwissen erhalten die Versuchspersonen einen Zuwachs von 4,26 Punkten im Mittel, während beim Verständnis dagegen nur Zuwächse von 2,21 Punkten erreicht werden. Die Zusammenfassung der Ergebnisse kann der Tabelle V-7 mit ihrer graphischen Darstellung in Abbildung V-10 entnommen werden.

Tabelle V-7: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte

		N	M	SD	Min	Max	Spannweite
Vortest	Summenscore gesamt (Item 1-10)	185	17,53	3,20	11	25,5	14,5
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-6)	185	16,70	2,61	11	23	12
	Summenscore Verständnis (Item 7-10)	185	0,82	1,27	0	7,5	7,5
Nachtest	Summenscore gesamt (Item 1-10)	185	24,00	4,09	12	36	24
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-6)	185	20,97	2,33	12	24	12
	Summenscore Verständnis (Item 7-10)	185	3,04	2,70	0	12	12
Differenz NT-VT	Lernzuwachs gesamt (Item 1-10)	185	6,48	3,96	-4,5	17	21,5
	Zuwachs Faktenwissen (Item 1-6)	185	4,26	3,09	-4	11	15
	Zuwachs Verständnis (Item 7-10)	185	2,21	2,35	-3,5	10	13,5

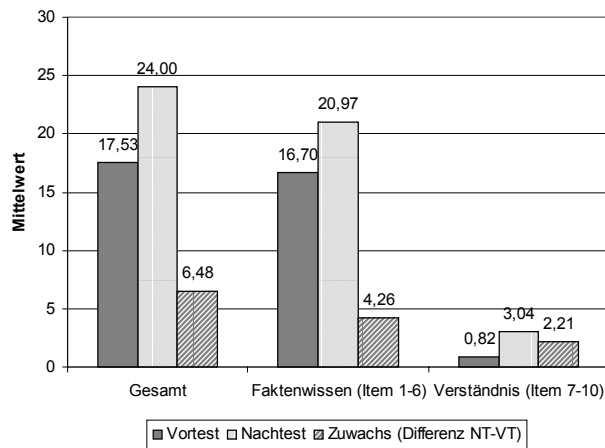


Abbildung V-10: Mittelwerte für Vor- und Nachtest sowie den Zuwachs in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis

4.1.4 Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest

Zwischen den Vor- und Nachtestergebnissen bestehen in allen Kategorien des Lernerfolgs paarweise Zusammenhänge, die durchweg das Signifikanzniveau erreichen (s. Tabelle V-8). Bei der Gesamtpunktzahl und dem Verständnis handelt es sich um mittlere Korrelationen zwischen den beiden Tests ($r(\text{Gesamtpunktzahl VT/NT})=0,432$, und $r(\text{Verständnis VT/NT})=0,495$; für beide ist $p<0,01$), während die Korrelation im Faktenwissen zwischen Vor- und Nachtest eher als gering einzustufen ist ($r(\text{Faktenwissen VT/NT})=0,223$; $p<0,01$). Letzteres könnte auf den berichteten Deckeneffekt im Faktenwissen des Nachtests zurückzuführen sein.

Tabelle V-8: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs. Die Kategorien, die trivialerweise hochsignifikant miteinander korrelieren, sind abgeblendet dargestellt.

			Vortest			Nachtest		
			Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	Summe Verständnis (Item 7-10)	Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	Summe Verständnis (Item 7-10)
Vortest	Gesamtpunktzahl	r	1	0,923**	0,616**	0,432**	0,230**	0,456**
	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	r	-	1	0,266**	0,336**	0,223**	0,316**
	Summe Verständnis (Item 7-10)	r	-	-	1	0,395**	0,120	0,495**
Nachtest	Gesamtpunktzahl	r	-	-	-	1	0,779**	0,842**
	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	r	-	-	-	-	1	0,317**
	Summe Verständnis (Item 7-10)	r	-	-	-	-	-	1

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

4.2 Der Einfluss des Vorwissens auf den Lernerfolg

4.2.1 Definition des Lernermerkmals „Vorwissen“

Zur Definition der unabhängigen Variable „Vorwissen“, deren Einfluss auf die abhängige Variable „Lernerfolg“ untersucht werden soll, ist es notwendig, Wissen in die Kategorien „Faktenwissen“ und „Verständnis“ zu differenzieren. Unter „Faktenwissen“ wird in Übereinstimmung mit verschiedenen Autoren (Gage & Berliner, 1977; Lewalter, 1997; Plass et al., 1998) die Kenntnis von Begriffen und Definitionen sowie von Tatsachen und Eigenschaften angesehen. Das Gelernte wird in erster Linie nur wiedererkannt. Darüber hinaus kann die oberflächliche Struktur einer Information reproduziert werden. Verständnis zeichnet sich dagegen dadurch aus, dass gelernte Bedeutungen und Definitionen auf andere Kontexte übertragen werden können. Die Bedeutungen und Definitionen sind in diesem Fall gedanklich so gut durchdrungen, dass auf ihrer Basis Schlussfolgerungen und Interpretationen vorgenommen werden können. Lewalter (1997) kennzeichnet Verständnis als Anwendung des Wissens in Aufgaben, die in direktem Zusammenhang mit den Lerninhalten stehen. Verständnis kann im Hinblick auf die Verarbeitung des Gelernten noch weiter gefasst werden. Damit gehört zum „Verständnis“ neben der Erfassung eines zentralen Gedanken auch die Anknüpfung an bereits vorhandenes Wissen (Elaboration).

Aus diesen Definitionen von „Faktenwissen“ und „Verständnis“ geht unmittelbar hervor, dass ein tieferes Verständnis nur auf der Basis eines bereits vorhandenen Faktenwissens erreicht werden kann. Entsprechend wird zur Definition der unabhängigen Variable „Vorwissen“ das bereits vorhandene themenspezifische Faktenwissen zugrunde gelegt, das durch den Vortest erhoben wurde. Es wird erwartet, dass sich signifikante Zusammenhänge zwischen dem Faktenwissen im Vortest und der Verständnisleistung ergeben. Die empirische Überprüfung hierzu sollte zeigen, ob das zum Thema Biomembranen getestete Faktenwissen ein geeigneter Prädiktor für die Lernleistung in der Kategorie Verständnis ist. Diese Analyse wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

4.2.2 Korrelationen zwischen Faktenwissen und Verständnis

Für die Definition der unabhängigen Variable „Vorwissen“ sind die Zusammenhänge zwischen dem Faktenwissen im Vortest und den Verständnisleistungen in Vor- und Nachtest sowie der Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen und dem Zuwachs im Verständnis wie erläutert von besonderem Interesse. Wie Tabelle V-9 zeigt, korreliert das Faktenwissen im Vortest mit der Verständnisleistung im Vortest ($r=0,266$, $p<0,01$), im Nachtest ($r=0,316$, $p<0,01$) und der Differenz ($r=0,220$, $p<0,01$) hochsignifikant. Diese Ergebnisse belegen, dass sich das Faktenwissen zum Thema Biomembranen positiv auf die Verständnisleistung auswirkt. Auf der Basis dieses Faktenwissens über die biologischen Membranen sollte damit erwartungsgemäß tiefergehendes Verständnis aufgebaut werden können. Das bereits vorhandene Faktenwissen kann daher in dieser Studie mit dem themenspezifischen Vorwissen gleichgesetzt werden. Entsprechend wurde zur Definition der Variable „Vorwissen“ der Summenscore derjenigen Items des Vortests herangezogen, die das Faktenwissen überprüfen (s. u. 4.2.1 in diesem Kapitel und IX 6.3).

Tabelle V-9: Bivariate Korrelationen nach Pearson zwischen dem Faktenwissen im Vortest und den Verständnisleistungen in Vor- und Nachtest zum Thema „Transportprozesse an Biomembranen“

		Verständnis Vortest	Verständnis Nachtest	Zuwachs Verständnis Differenz NT-VT
Faktenwissen Vortest	r	0,266**	0,316**	0,220**
	N	185	185	185

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

4.2.3 Clusteranalyse zur Einteilung der Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau

Um die 185 Versuchspersonen in zwei Gruppen einzuteilen, die sich signifikant in ihrem themenspezifischen Faktenwissen und damit in ihrem Vorwissen unterscheiden, wurden die Summenscores des Faktenwissens im Vortest einer Clusteranalyse unterzogen. Die deskriptiven Statistiken für die beiden resultierenden Gruppen sind in Tabelle V-10 und Tabelle V-11 aufgeführt.

Tabelle V-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“

<i>Geringes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-6) Vortest	112	11,0	17,0	15,06	1,83

Tabelle V-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“

<i>Hohes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-6) Vortest	73	18,0	23,0	19,22	1,30

Die beiden Gruppen unterscheiden sich in der Anzahl der zugeordneten Versuchspersonen. Der erste Cluster, dem die Personen mit geringem Vorwissen zugeordnet werden, umfasst eine Teilpopulation von 60% der Gesamtstichprobe, während der zweite Cluster „hohes Vorwissen“ dagegen nur 40% der Versuchspersonen der Gesamtstichprobe einschließt. Personen mit geringem Vorwissen erreichen zwischen 11 und 17 Punkten im Faktenwissen des Vortests. Entsprechend werden Personen mit mehr als 17 Punkten dem zweiten Cluster „hohes Vorwissen“ zugeordnet.

4.2.4 Gruppenvergleich (t-Test)

Wie der Tabelle V-12 zu entnehmen ist, sind die Lernzuwächse beim Verständnis in beiden Vorwissensgruppen als eher gering einzustufen. Die Mittelwerte der beiden Vorwissensgruppen (gering vs. hoch) unterscheiden sich jedoch statistisch bedeutsam ($t(183)=-2,708$, $p<0,01$). Unter denselben Versuchsbedingungen, d. h. mit derselben computergestützten Lernumgebung, verbessern Personen mit großem Vorwissen deutlicher ihrer Verständnisleistung als Personen mit geringem Vorwissen. Hier zeigt sich, dass das Vorwissen den Erwerb von Verständnis entscheidend beeinflusst und bei den nachfolgenden Untersuchungen als Einflussgröße zu berücksichtigen ist. Dann wird insbesondere die Frage

von Interesse sein, ob eine bestimmte multimediale Gestaltungsweise in der Lage ist, bei Vorwissensdefiziten kompensatorisch zu wirken.

Tabelle V-12: Unterschied in der Verständnisleistung der beiden Vorwissensgruppen.

Angegeben sind die Stichprobengrößen, Mittelwerte, Standardabweichungen und der T-Wert.

Abhängige Variable	Vorwissen	N	M	SD	t(183)
Zuwachs Verständnis	gering	112	1,84	2,02	-2,708**
	hoch	73	2,78	2,70	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

4.3 Der Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernerfolg

4.3.1 Clusteranalyse zur Einteilung von Verbalisierern und Visualisierern

184 Versuchspersonen wurden durch eine Clusteranalyse in Verbalisierer und Visualisierer eingeteilt. Eine Person machte bezüglich ihrer Lernpräferenzen keine Angaben. Die Gruppierung in diese beiden Kategorien wurde auf der Basis der Mittelwerte der Skalen für die Variablen „verbale Lernpräferenz“ und „visuelle Lernpräferenz“ vorgenommen. Durch die Clusteranalyse wurden 116 Personen den Verbalisierern und 68 Personen den Visualisierern zugeordnet. Diese beiden Gruppen unterscheiden sich sowohl in den Mittelwerten ihrer verbalen als auch in ihrer visuellen Lernpräferenz maximal. Tabelle V-13 und Tabelle V-14 fassen die deskriptiven Statistiken für die beiden Cluster zusammen.

Tabelle V-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“

<i>Verbalisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	116	1,00	3,00	2,26	0,40
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	116	0,00	2,50	1,29	0,50

Tabelle V-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“

<i>Visualisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	68	0,17	2,33	1,51	0,49
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	68	1,00	3,00	1,93	0,46

Die Zuordnung zu den Clustern erfolgt mehrheitlich nach der dominanten Lernpräferenz. Die Verbalisierer erreichen bei der verbalen Lernpräferenz stets größere Mittelwerte als bei der visuellen Lernpräferenz. Bei den Visualisierern können die Mittelwerte für die verbale Lernpräferenz dagegen die der visuellen Lernpräferenz minimal überschreiten. Aus dem Streudiagramm (s. Abbildung V-11) und den Tabellen geht hervor, dass ein Teil der Verbalisierer und Visualisierer mit beiden Kompetenzen gleichermaßen ausgestattet ist. Auf die Bildung von zwei Extremgruppen wurde dennoch verzichtet, um die Stichprobenzahlen bei den nachfolgenden Vergleichen nicht unnötig zu dezimieren.

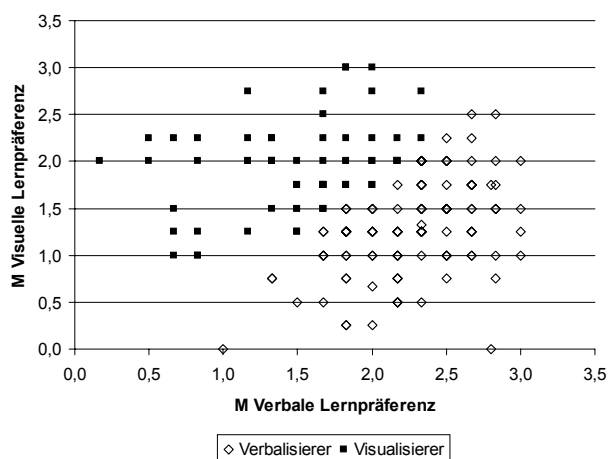


Abbildung V-11: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“ in der Studie 1

Auf der Abszisse sind die Mittelwerte der verbalen Lernpräferenz, auf der Ordinate diejenigen für die visuelle Lernpräferenz aufgetragen.

4.3.2 Ergebnisse des Gruppenvergleichs (t-Test)

Für jede der drei abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* wurde ein t-Test mit der Lernpräferenz (Verbalisierer, Visualisierer) als Gruppenvariable durchgeführt. Keine der beiden Gruppen scheint von ihrer jeweiligen Kompetenzen beim computergestützten Lernen eindeutig zu profitieren: die Verbalisierer erreichen bessere Ergebnisse im Hinblick auf den Zuwachs im Faktenwissen, während die Visualisierer beim Erwerb von Verständnis profitieren. Die Mittelwerte der beiden Gruppen unterscheiden sich jedoch nur so geringfügig, dass diese Effekte nicht das Signifikanzniveau erreichen. Die Stichprobengrößen, Mittelwerte, Standardabweichungen und T-Werte können der Tabelle V-15 entnommen werden.

Tabelle V-15: Unterschiede in den Leistungen bzgl. *Lernzuwachs gesamt*, Faktenwissen und Verständnis für die Gruppen „Verbalisierer“ und „Visualisierer“

Abhängige Variable	Gruppe	N	M	SD	t(182)
Lernzuwachs gesamt	Verbalisierer	116	6,40	3,77	-0,399 (n.s.)
	Visualisierer	68	6,64	4,28	
Zuwachs Faktenwissen	Verbalisierer	116	4,35	2,93	0,467 (n.s.)
	Visualisierer	68	4,13	3,37	
Zuwachs Verständnis	Verbalisierer	116	2,05	2,30	-1,291 (n.s.)
	Visualisierer	68	2,51	2,42	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

4.4 Kognitive Belastung

In der folgenden Analyse wird die kognitive Belastung als weitere abhängige Variable betrachtet. Mittels t-Test wurde untersucht, ob sich die beiden Vorwissensgruppen (gering vs. hoch) hinsichtlich ihrer subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung unterscheiden. Personen mit geringem Vorwissen gaben an, sich stärker als Personen mit hohem Vorwissen kognitiv belastet gefühlt zu haben. Der beschriebene Effekt erreicht das Signifikanzniveau ($t(182)=2,334$, $p<0,05$). Die Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen finden sich in Tabelle V-16.

Tabelle V-16: Unterschied in der kognitiven Belastung bei unterschiedlich großem Vorwissen. Angegeben sind die Stichprobengrößen, Mittelwerte, Standardabweichungen und der T-Wert.

Abhängige Variable	Vorwissen	N	M	SD	t(182)
Kognitive Belastung	gering	111	1,56	0,59	2,334*
	hoch	73	1,37	0,50	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

Wie der Tabelle V-17 entnommen werden kann, existieren jedoch keine nennenswerten Korrelationen zwischen der kognitive Belastung der Versuchspersonen und den Zuwächsen der drei abhängigen Variablen Lernzuwachs gesamt, Faktenwissen und Verständnis.

Tabelle V-17: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der kognitiven Belastung und den drei Maßen des Lernerfolgs

		M Kognitive Belastung
Lernzuwachs gesamt	r	-0,032
	N	184
Zuwachs Faktenwissen	r	0,022
	N	184
Zuwachs Verständnis	r	-0,082
	N	184

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

5 DISKUSSION

5.1 Allgemeine Statistik

Die Versuchspersonen lernten in dieser Studie mit der computergestützten Lernumgebung erfolgreich. Dies belegen die Lernergebnisse, die im Nachtest signifikant besser als im Vortest ausfielen. Die Versuchspersonen hatten also keine größeren Schwierigkeiten bei der Bearbeitung dieses Lernprogramms. Die Art der Darstellungen in der Lernumgebung kann also für die Stichprobe als geeignet angesehen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Probanden in dieser ersten Untersuchung vorwiegend Faktenwissen erwarben. Der Lernzuwachs im Verständnis war eher als gering zu bezeichnen. Dies zeigt, dass die Versuchspersonen offensichtliche Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Verständnisaufgaben hatten.

Die folgenden Studien bieten allerdings erst die Möglichkeit, zu untersuchen, ob bestimmte Elemente der Darstellung besonders geeignet sind, den Erwerb von Verständnis zu fördern. Dazu ist es nämlich notwendig, die verschiedenen Elemente wie Standbilder, Animationen und interaktive Animationen mit Parameterwahl (Simulationen), die hier in einer

Lernumgebung gezeigt wurden, einzeln in separaten Lernumgebungen darzustellen. Dies wurde erst ab Studie 2 (Atmungskette) verwirklicht. Des Weiteren wurde ab Studie 2 jeder Versuchsperson ein Einzelarbeitsplatz zur Verfügung gestellt. Auch dies könnte sich hinsichtlich des Verständnisses positiv auswirken.

5.2 Vorwissen

In dieser Studie wurde die untersuchte Stichprobe im Hinblick auf ihr themenspezifisches Vorwissen durch eine entsprechende Clusteranalyse nahezu halbiert: 60% der Versuchspersonen wiesen ein geringes Vorwissen auf; somit verblieben 40% der Gesamtstichprobe mit hohem Vorwissen. Obwohl in beiden Gruppen nur geringe Zuwächse beim Verständnis zu verzeichnen sind, unterscheiden sich diese beiden Subpopulationen in Bezug auf diese abhängige Variable signifikant. Personen mit hohem Vorwissen erzielen deutlich bessere Zuwächse im Verständnis als Personen mit geringem Vorwissen. Hieran wird deutlich, dass das themenspezifische Vorwissen wie vermutet einen entscheidenden Einfluss auf das Verständnis von komplexen biologischen Vorgängen hat. Im Folgenden muss daher geklärt werden, wie gerade bei Personen mit geringem Vorwissen das Verständnis von solch komplexen Vorgängen an biologischen Membranen durch den Einsatz von Multimedia verbessert werden kann. Hier bleibt also zu zeigen, ob es eine spezifische Version einer Lernumgebung gibt, die in der Lage ist, bei Vorwissensdefiziten kompensatorisch zu wirken (s. III 2).

5.3 Lernpräferenz

Die Clusteranalyse liefert 116 Verbalisierer (67% der Gesamtstichprobe) und 68 Visualisierer (37% der Gesamtstichprobe). Damit dominierte die verbale Lernpräferenz in der Gesamtstichprobe dieser Untersuchung. In dieser Studie zeigte sich jedoch kein Einfluss der Lernpräferenz beim Lernen mit Multimedia. Dies entspricht auch insofern der Erwartung, als in der Lernumgebung dieser Studie einheitlich alle multimedialen Elemente angeboten wurden. Auf diese Weise wurde die verbale Lernpräferenz durch die Lehrtexte gleichermaßen gut bedient wie die visuelle durch das bildliche Material, also Standbilder und Animationen. Im Hinblick auf die Studien 2 und 3 wird die Lernpräferenz aber weiterhin zu kontrollieren sein, da insbesondere hier ein Interaktionseffekt mit den unterschiedlichen Lernumgebungen von Interesse ist (s. III 2). Es wird dann also zu klären sein, ob eine bestimmte Lernumgebung einen der beiden Lernertypen besonders anspricht.

5.4 Kognitive Belastung

Personen mit geringem Vorwissen fühlten sich signifikant stärker kognitiv belastet als Personen mit großem Vorwissen. Damit muss das Vorwissen im Hinblick auf die kognitive Belastung auch in den folgenden Studien berücksichtigt werden. Es wird zu klären sein, ob bestimmte Elemente der in dieser Studie verwendeten Lernumgebung die kognitive Belastung bei Personen mit geringem Vorwissen besonders ungünstig beeinflusst haben. Des Weiteren wird zu untersuchen sein, ob bei ebendiesen Personen die kognitive Belastung durch unterstützende Maßnahmen gesenkt werden kann. Anderen Studien ergaben, dass das kooperative Lernen an einem Computerarbeitsplatz gerade beim Lernen mit Simulationen eine zusätzliche kognitive Belastung darstellt (Schnotz et al., 1998). Dieser Effekt hat nur in Studie 1 möglicherweise eine Rolle gespielt. Er wird ab Studie 2 nicht mehr relevant sein, da den Versuchspersonen Einzelarbeitsplätze zur Verfügung gestellt werden.

In dieser Untersuchung waren allerdings keine positiven oder negativen Auswirkungen der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg nachzuweisen. Die Korrelationen der kognitiven Belastungen mit den drei erfassten Kategorien des Lernerfolgs waren sämtlich nicht signifikant. Dies könnte als Hinweis darauf gewertet werden, dass die Versuchspersonen beim computergestützten Lernen angemessen kognitiv ausgelastet waren. Damit muss sich zeigen, ob dies für alle der eingesetzten multimedialen Elemente gilt oder nur auf spezielle Elemente in der Lernumgebung zurückzuführen ist.

5.5 Zusammenfassung

Ziel der Studie 1 (Biomembranen) war es, empirisch zu überprüfen ob die gewählte didaktische Reduktion und das daraus resultierende Komplexitätsniveau der zu vermittelnden biologischen Lerninhalte im Computerprogramm prinzipiell der 11. Jahrgangsstufe angemessen ist. Ferner sollte untersucht werden, ob der prinzipielle Aufbau und die Struktur der Lernumgebung benutzerfreundlich und für die Versuchspersonen plausibel ist. Mit Blick auf die Hypothese 3, Hypothese 4 und Hypothese 6 (s. III 2) wurden die Faktoren Vorwissen, Lernpräferenz und kognitive Belastung bezüglich ihres Einflusses auf die Lernleistung untersucht und getestet, ob in dieser Studie für diese Einflussgrößen signifikante Haupteffekte nachzuweisen sind.

Anhand der signifikant besseren Lernleistung im Nachtest kann die gewählte didaktische Reduktion und das resultierende Komplexitätsniveau der biologischen Inhalte in der computergestützten Lernumgebung als angemessen angesehen werden. Die Bearbeitung des Lernprogramms bereitete den Versuchspersonen somit keine größeren Schwierigkeiten. Das Vorwissen der Versuchspersonen erwies sich wie erwartet als die Verständnisleistung beeinflussender Faktor und muss damit in den folgenden Studien weiterhin kontrolliert werden. Für die Lernpräferenz wird dagegen erst in den folgenden Studien zu zeigen sein, ob eine bestimmte Art der Gestaltung einen Lernertyp besser im Erwerb von Verständnis unterstützt. Personen mit geringem Vorwissen fühlten sich in dieser Untersuchung signifikant stärker belastet als Personen mit hohem Vorwissen. Ob die unterschiedlich starke kognitive Belastung auf das kooperative Lernen in dieser Studie oder auf gewisse Elemente der multimedialen Gestaltung zurückzuführen ist, wird sich erst in den nächsten Studien zeigen. Da dies jedoch keinen negativen Einfluss auf die Lernleistung hatte, kann dies als Hinweis darauf gewertet werden, dass die Versuchspersonen bei der Bearbeitung der Lernprogramme angemessen kognitiv ausgelastet waren.

VI STUDIE 2 (ATMUNGSKETTE)

Als biologischer Inhalt der zweiten Studie wurde der Aufbau und die Funktion der inneren Mitochondrienmembran behandelt. Daher werden in diesem Kapitel zu Beginn im Abschnitt 1 die relevanten Strukturen und Vorgänge der Atmungskette aus fachwissenschaftlicher Perspektive beleuchtet, um die Komplexität der zu behandelnden Inhalte zu verdeutlichen. Der didaktischen Reduktion ist der Abschnitt 2 gewidmet. Im Abschnitt 3, dem Material- und Methodenteil der Studie 2, werden die spezifischen Lernumgebungen und Erhebungsinstrumente dieser Studie vorgestellt und ihre Besonderheiten erörtert. Der Abschnitt 4 widmet sich der Darstellungen der Ergebnisse. In dieser Studie basiert die Datenauswertung auf zwei komplementären Methoden, den varianzanalytischen Verfahren zur quantitativen Bewertung der Daten und den probabilistischen Testmodellen zur ergänzenden qualitativen Beurteilung. Die so erhaltenen Ergebnisse werden im Abschnitt 5 zusammenfassend vergleichend diskutiert.

1 DIE ATMUNGSKETTE AUS FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE

Den Hauptanteil ihrer Energie gewinnen tierische und pflanzliche Zellen durch den oxidativen Abbau energiereicher organischer Moleküle wie Zucker und Fette. Dabei werden die Ausgangsstoffe, wie z. B. der Zucker Glucose, unter Sauerstoffverbrauch in die energieärmeren Produkte Kohlenstoffdioxid und Wasser überführt. Dieser katabole Reaktionsweg wird als Zellatmung bezeichnet. Die Zellatmung ist ein Funktionskomplex aus Glycolyse, Citratzyklus und Atmungskette. Durch letztere wird die Energie organischer Moleküle für die Zelle nutzbar in ATP gespeichert, das in der Zelle als universeller Energielieferant einsetzbar ist.

Außer der Glycolyse, deren Reaktionskompartiment das Cytosol ist, findet die Zellatmung in den Mitochondrien statt. Hier werden die durch die Glycolyse vorbereiteten Substrate im Citratzyklus oxidiert und oxidativ decarboxyliert¹⁰. Durch diese Oxidationen entsteht in der Mitochondrienmatrix $\text{NADH}+\text{H}^+$. In der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran wird $\text{NADH}+\text{H}^+$ mit Sauerstoff zu Wasser umgesetzt. Dies ist eine stark exergonische Reaktion – formal betrachtet entspricht sie der Knallgasreaktion¹¹. Die bei dieser biologischen Oxidation freiwerdende Energie wird zum Transport von Protonen gegen ihren Gradienten verwendet. Der resultierende Protonengradient ist die Triebkraft für die

abschließende ATP-Synthese. Die Oxidation von Wasserstoff kann nicht unkontrolliert an der inneren Mitochondrienmembran ablaufen. Daher soll im Folgenden der Aufbau der inneren Mitochondrienmembran vorgestellt werden, deren Komponenten durch schrittweise Oxidation des $\text{NADH}+\text{H}^+$ diese stark exergonische Reaktion zu „entschärfen“ vermögen. Im Anschluss daran wird der eigentliche Vorgang der biologischen Oxidation von $\text{NADH}+\text{H}^+$, die Atmungskette, dargestellt.

1.1 Aufbau der inneren Mitochondrienmembran

In der inneren Mitochondrienmembran befinden sich fünf verschiedene Proteinkomplexe, die den Ablauf der Atmungskette gewährleisten. Die Komplexe I, III und IV sind direkt an der Elektronenübertragung von Wasserstoff auf Sauerstoff beteiligt, während der Komplex II ein membranständiges Enzym des Citratzyklus ist. Hinzu kommt ein weiterer Komplex für die Bildung des Energieäquivalents ATP, die ATP-Synthase.

Komplex I (NADH-Dehydrogenase-Komplex) speist Elektronen vom $\text{NADH}+\text{H}^+$ in die Atmungskette ein. Er besteht aus einem Membranteil und einem peripheren Teil, der in die Mitochondrienmatrix hineinragt. Von allen Komponenten verfügt er über den komplexesten Aufbau: die beiden Teile bestehen insgesamt aus mehr als 40 Untereinheiten. Als prosthetische Gruppen, die am Elektronentransport beteiligt sind, enthält er ein gebundenes Flavinmononucleotid (FMN) und mehrere Eisen-Schwefel-Zentren. Der periphere Teil des Proteins verfügt über eine Bindungsstelle für $\text{NADH}+\text{H}^+$, der Membranteil kann Ubichinon binden. Ubichinon gehört zur Gruppe der Lipide und ist damit als einzige Komponente der Atmungskette kein Protein. Aufgrund seiner unpolaren Eigenschaften liegt es in der inneren Mitochondrienmembran gelöst vor und ist in ihr lateral beweglich. Mit Hilfe von Ubichinonen wird der Elektronentransport zwischen den Komplexen I und III vermittelt (der Komplex II ist bei dieser Elektronenübertragung nicht beteiligt. Seine Funktion wird weiter unten in diesem Abschnitt geschildert).

Komplex III (Cytochrom-b/c₁-Komplex) ist ein integrales Membranprotein und besteht aus neun bis elf Untereinheiten. Die Cytochromuntereinheiten verfügen über Häm-Gruppen als prosthetische Gruppe. Andere Untereinheiten binden dagegen Eisen-Schwefelzentren. Vom Komplex III werden die Elektronen an der zum Intermembranraum gerichteten Seite der inneren Mitochondrienmembran auf ein Cytochrom-c-Protein übertragen. Cytochrom c ist ein peripheres Membranprotein mit einem Häm als prosthetischer Gruppe. Es ist über einen Membrananker locker mit der Membran verbunden und damit lateral an der Membran beweglich. Es vermittelt den Elektronentransport zwischen den Komplexen III und IV. Komplex IV (Cytochrom-a/a₃-Komplex, Cytochrom-Oxidase) besteht aus mehr als 10

Untereinheiten. Die Elektronen werden hier über ein Kupfer-Schwefel-Zentrum und über die Häm-Gruppen der Cytochrome auf den Sauerstoff übertragen. Unter Aufnahme von Protonen wird an diesem Komplex das zweite Reaktionsprodukt der Atmungskette, das Wasser, freigesetzt.

Die ATP-Synthase (F_1/F_0 -Komplex) ist ein integrales Membranprotein, das unter Ausnutzung eines transmembranen Protonengradienten ATP aus ADP und anorganischem Phosphat synthetisiert. Sie besteht aus einem integralen Faktor (F_0) und einem zur Mitochondrienmatrix gewandten peripheren Faktor (F_1). Der integrale Faktor bildet einen Protonenkanal durch die Membran, während am peripheren Teil ATP synthetisiert wird.

1.2 Die Atmungskette

Durch die biologische Oxidation von coenzymgebundenem Wasserstoff an den Proteinkomplexen der inneren Mitochondrienmembran gewinnen Lebewesen Energie für ihren Stoffwechsel. Dieser Vorgang wird als Atmungskette oder Endoxidation bezeichnet. Der Wasserstoff kann über zwei verschiedene Coenzyme in die Atmungskette eingeschleust werden. Die erste Möglichkeit besteht in einer Bindung an NAD^+ . Ein weiterer Teil des Wasserstoffs wird an FAD im Verlauf des Citratzyklus gebunden und auf diesem Wege für die Endoxidation bereitgestellt. Diese beiden Wege werden im Folgenden näher erläutert.

1.2.1 Kopplung von Elektronen- und Protonentransport

Zur Oxidation bindet $NADH+H^+$ an den Komplex I und überträgt 2 Elektronen auf eine prosthetische Gruppe. Das oxidierte NAD^+ wird in der Mitochondrienmatrix freigesetzt. Die reduzierte prosthetische Gruppe gibt die Elektronen an die nächste prosthetische Gruppe im Komplex ab. Durch weitere Redoxreaktionen im Komplex I werden die Elektronen auf Ubichinon übertragen. Voraussetzung dafür, dass solche Redoxreaktionen ablaufen können, ist das Bestehen einer Potentialdifferenz zwischen den Reaktionspartnern. Die Elektronen werden vom Reaktionspartner mit negativerem Potential auf denjenigen mit positiverem Potential übertragen. Durch den Elektronenfluss entlang der Potentialdifferenz wird elektrische Arbeit geleistet, die für einen aktiven Transport von Protonen aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gegen ihren Konzentrationsgradienten genutzt wird. Am Komplex I werden bezogen auf 2 Elektronen vom $NADH+H^+$ 4 Protonen von der Matrix in den Intermembranraum befördert.

Nachdem Ubichinon vom Komplex I zum Ubichinol reduziert worden ist, bewegt es sich durch die Membran zum Komplex III und überträgt ihm die beiden Elektronen. Der Mechanismus der Kopplung von Elektronen- und Protonentransport ist für den Komplex III gut untersucht. Postuliert wird ein Q-Zyklus, durch den die im Komplex III transportierten Protonen pro Elektron auf zwei verdoppelt werden. Der Komplex III verfügt über zwei Bindestellen für Ubichinon bzw. seine reduzierte Form Ubichinol. Eine der Bindestellen ist an der Matrixseite des Komplexes gelegen, die andere an der Intermembranraumseite. Das Ubichinol bindet nun an der Intermembranraumseite, überträgt eines seiner beiden Elektronen auf ein hier gelegenes Eisen-Schwefel-Zentrum und wird so zum Semichinon oxidiert. Vom Eisen-Schwefelzentrum gelangt das erste Elektron des Ubichinols zum Cytochrom c. Das Semichinon überträgt dagegen sein Elektron auf ein Häm b an der Intermembranraumseite des Komplexes und wird so wieder zum Ubichinon oxidiert. Vom Häm b an der Intermembranraumseite gelangt das Elektron zum zweiten Häm b an der Matrixseite. Die beiden Protonen, die vom Ubichinol mit zum Komplex III transportiert worden sind, werden dabei in den Intermembranraum abgegeben. Vom Häm b an der Matrixseite des Komplexes wird das Elektron wiederum auf ein Ubichinon übertragen, das dadurch zum Semichinon reduziert wird. Dabei werden zwei Protonen aus der Matrix aufgenommen. Damit dieses Semichinon abschließend wieder zum Ubichinol reduziert werden kann, muss ein weiteres vom Komplex I reduziertes Ubichinon den eben beschriebenen Prozess durchlaufen. Das Semichinon erhält dadurch ein weiteres Elektron vom Häm b an der Matrixseite. Das resultierende Ubichinol kann erneut in den Q-Zyklus eintreten. Bezogen auf zwei in den Q-Zyklus eintretende Ubichinole werden damit vier Protonen von der Matrix in den Intermembranraum befördert und ein neues Ubichinol gebildet, das wiederum in den Q-Zyklus eintreten kann, und zwei Elektronen auf Cytochrom-c-Proteine transferiert.

Cytochrom c überträgt die Elektronen auf den Komplex IV. Ein Sauerstoffmolekül bindet an ein Cytochrom im Komplex IV. Die beiden Elektronen werden auf den Sauerstoff übertragen. Die Redoxreaktionen im Komplex IV liefern die Energie, um zwei weitere Protonen von der Matrix in den Intermembranraum zu befördern. Zu seiner vollständigen Reduktion zu 2 Molekülen Wasser benötigt der molekulare Sauerstoff am Komplex IV zwei weitere Elektronen, die durch die Oxidation eines weiteren $\text{NADH} + \text{H}^+$ geliefert werden. Auch diese Elektronen durchlaufen die Atmungskette bis zum Komplex IV, wobei 10 weitere Protonen an den Komplexen von der Matrix in den Intermembranraum befördert werden. Bei der Reduktion des Sauerstoffs am Komplex IV werden neben den 4 Elektronen 4 Protonen aus der Matrix aufgenommen. Aus dem Sauerstoff entstehen mit den vier Elektronen und vier Protonen zwei Wassermoleküle, die in der Matrix freigesetzt werden.

Bezogen auf 2 Moleküle $\text{NADH}+\text{H}^+$ werden an den Komplexen 20 Protonen von der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gepumpt. Damit besteht ein Konzentrationsgradient für Protonen über der inneren Mitochondrienmembran. Protonen tragen eine einfache positive Ladung. Da den exportierten Protonen keine Anionen in den Intermembranraum folgen, entsteht eine ungleiche Verteilung von Ladungen über der inneren Mitochondrienmembran. Diese Potentialdifferenz – das Membranpotential – in Kombination mit dem Konzentrationsgradienten fungiert als vorläufiger Energiespeicher für die bei der Oxidation von $\text{NADH}+\text{H}^+$ freigewordenen Energie. Wie dieser Protonengradient für die Synthese von ATP genutzt wird, beschreibt der nächste Abschnitt.

1.2.2 Die ATP-Synthese

Das Enzym der ATP-Synthese, die ATP-Synthase, ist eng mit den Protonenpumpen verwandt, die unter ATP-Spaltung Protonen gegen ihren Gradienten aus der Zelle befördern. An der ATP-Synthase findet die Umkehrung dieses Transportprozesses statt: ein transmembraner Protonengradient dient der Synthese von ATP aus ADP und anorganischem Phosphat, während die Protonenpumpe einen Protonengradienten unter ATP-Spaltung erzeugt. Der für die ATP-Synthese notwendige Protonengradient wird durch die Atmungskette erzeugt und aufrecht erhalten. An den Komplexen der Atmungskette wird die Energie des Elektronentransports dazu genutzt, Protonen gegen ihren Gradienten in den Intermembranraum zu transportieren. Diffundieren die Protonen entlang ihres Gradienten durch den Membranteil der ATP-Synthase zurück in die Mitochondrienmatrix, wird Energie frei, die die ATP-Synthase antreibt.

Der Mechanismus der ATP-Synthese ist in vielen Einzelheiten ungeklärt. Mit der sogenannten „Binding-Change-Hypothese“ wird ein dreistufiger Reaktionszyklus postuliert, der am peripheren Teil der ATP-Synthase stattfindet. Der Faktor F_1 verfügt über drei Bindestellen für ADP und ATP, die durch Konformationsänderungen des Proteins in einander überführbar sind und sich in ihrer katalytischen Aktivität unterscheiden. Zu jedem Zeitpunkt liegt jede der drei Bindungsstellen dann in einer anderen Konformation vor. Liegt eine Bindungsstelle L-Form (engl. „Low“) vor, können ADP und anorganisches Phosphat locker gebunden werden. Durch Konformationsänderung geht die Bindestelle in die T-Form (engl. „Tight“) über; jetzt werden ADP und anorganisches Phosphat sehr fest gebunden, ATP wird aus den Ausgangsstoffen synthetisiert. Unter Ausschluss von Wasser in dem katalytischen Zentrum des Proteins benötigt diese Reaktion keine Zufuhr von Energie. Das gebildete ATP bleibt zunächst fest an der Bindungsstelle gebunden. Erst die dritte Konformationsänderung bewirkt eine Überführung in die O-Form (engl. „Open“), in diesem Zustand wird das gebildete ATP freigesetzt.

Der Durchtritt von Protonen durch den Membranteil bewirkt die Konformationsänderung der drei Bindungsstellen. Dabei ist der energieverbrauchende Schritt nicht die ATP-Synthese selbst, sondern es wird angenommen, dass die Freisetzung eines neu gebildeten ATPs von der Bindungsstelle Energie erfordert. Die dazu erforderliche Konformationsänderung könnte energieabhängig geschehen. Ungeklärt ist bis jetzt, durch welchen Mechanismus der Protonenfluss die Konformationsänderung des Proteins auslöst.

1.2.3 Einspeisung von Elektronen über FADH_2

Komplex II (Succinatdehydrogenase) ist ein integrales Membranprotein und gehört zu den Enzymen des Citratzyklus. Hier werden bei der Oxidation von Succinat zu Fumarat Elektronen auf FAD übertragen; es entsteht FADH_2 , das den Komplex II nicht verlässt. Die Elektronen werden über ein Eisen-Schwefelzentrum auf Ubichinon übertragen. Diese Elektronenübertragung ist im Gegensatz zu denen an den anderen Komplexen der Atmungskette nicht mit einem Protonentransport verknüpft, da die Reaktionsenergie hierfür nicht ausreichend ist. Vom Ubichinon werden die Elektronen durch die Membran zum Komplex III transportiert. Der weitere Elektronentransport erfolgt dann analog zu dem der $\text{NADH}+\text{H}^+$ -Elektronen, der wiederum mit Protonentransport und ATP-Synthese gekoppelt ist.

2 DIE ATMUNGSKETTE AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE

Die vorangegangene Beschreibung der Atmungskette und ihrer beteiligten Komponenten in der inneren Mitochondrienmembran gibt einen Einblick in ihre Wirkungsweise und die enge Vernetzung von Struktur und Funktion bei diesem Vorgang. Ebenso wurden die physikalisch-chemischen Voraussetzungen erläutert, die für das Ablaufen dieses Prozesses relevant sind. Eine umfassende Betrachtung dieser Aspekte ist im Sachgebiet I-IV des schleswig-holsteinischen Biologielehrplans nicht vorgesehen. Des Weiteren ist nicht sichergestellt, ob in unseren Versuchsgruppen das Thema Redoxreaktionen im Rahmen des Chemieunterrichts erschöpfend behandelt wurde, so dass mit einer eingehenderen Betrachtung über die Phänomenebene hinaus das Anforderungsniveau überschritten und somit eher zur Verwirrung als zur Klärung beitragen würde. Infolgedessen wurde eine inhaltliche Reduktion der elektrochemischen Vorgänge auf einen allgemeineren Energiebegriff vorgenommen. Damit einher geht die eingeschränkte Erklärung der Komplexe in der inneren Mitochondrienmembran, quasi als „Blackbox“. Die Reaktionen an den Komplexen der inneren Mitochondrienmembran werden daher stets nach dem gleichen Prinzip geschildert: Ein Ausgangsstoff reagiert mit Hilfe des Komplexes zu einem

Zwischenprodukt in energieliefernder Reaktion. Durch die Energie werden Protonen gegen ihren Gradienten über die Membran befördert. Hier wird ein Teil des Transportkonzepts wieder aufgegriffen, das bereits aus der ersten Studie bekannt ist: aktiver Transport von Ionen, angetrieben durch chemische Reaktionen. Diese Beschreibung deckt sich nur zum Teil mit der in Schulbüchern. Einige Autoren fassen die Komponenten der Atmungskette insgesamt als „Blackbox“ zusammen und weisen nur auf den Zusammenhang von Elektronen- und Protonentransport hin, während andere ein detailliertes Schema der beteiligten Redoxsysteme bildlich darstellen. Bemerkenswerterweise wird in diesen Fällen das dahinterstehende Prinzip der freiwillig ablaufenden Redoxreaktionen nicht weiter ausgeführt, sondern die bildliche Darstellung bleibt eine detailschwere, nicht reflektierte Zusatzinformation zum meist allgemein gehaltenen Text (Text-Bild-Schere). Von dieser Perspektive aus wurde für die Erläuterung und die bildliche Darstellung der Inhalte ein mittleres Komplexitätsniveau gewählt wie oben geschildert. Eine Erweiterung erfahren die beschriebenen Transportprinzipien mit der Präsentation der ATP-Synthese: hier wird die Funktionsweise einer Ionenpumpe umgekehrt. Die Energie eines passiven Transports von Protonen muss nicht wie beim sekundär aktiven Transport für den sofortigen Cotransport von Ionen genutzt werden, sondern kann der Synthese einer chemischen Verbindung dienen. Auf die genaue mechanistische Erläuterung des Prozesses wurde verzichtet, jedoch werden die drei Schritte des Modells der ATP-Bildung beibehalten.

Mit der Darstellung der grundlegenden Prinzipien der Energiekonversion an der inneren Mitochondrienmembran, vom NAD^+ -gebundenen Wasserstoff über die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport und damit einhergehendem Aufbau eines Protonengradienten bis hin zur ATP-Synthese, wurde damit den Forderungen des Lehrplans nachgekommen. Dabei wurden bereits bekannte Transportprozesse erneut aufgegriffen und in einem neuen Kontext vertieft. Eine Erweiterung erfährt das Membrankonzept durch die Funktion der Atmungskette, die Reaktionsenergie einer biologischen Oxidation durch die Kopplung unterschiedlicher Transportprozesse in einer chemischen Verbindung (ATP) zu speichern.

3 MATERIAL UND METHODE

In diesem Kapitel „Material und Methoden“ der Studie 2 (Atmungskette) werden die Kennzeichen der in dieser Untersuchung verwendeten Lernumgebungen ausführlich dargestellt. Des Weiteren werden die Besetzungen der Experimentalgruppen und Stichprobengrößen vorgestellt sowie die charakteristischen Kennwerte der in dieser Studie verwendeten Erhebungsinstrumente näher erläutert.

3.1 Lernumgebungen der Studie 2

Die zweite Studie (Atmungskette) diente wie auch die dritte Studie (Fotosynthese) der Überprüfung der Forschungshypothesen (s. III 2). Hierzu wurden verschiedene Versionen von Lernumgebungen entwickelt. Es wurde darauf geachtet, dass die vermittelten biologischen Inhalte zur Atmungskette zwischen den Versionen nicht variieren, um keine der Versuchsgruppen im Wissenserwerb zu bevorzugen oder zu benachteiligen. Das Thema Atmungskette wurde in den Lernumgebungen basierend auf dem Abschnitt 1 behandelt, wobei aus didaktischer Perspektive die geschilderten Einschränkungen der fachlichen Inhalte vorgenommen werden mussten (s. Abschnitt 2). Die Lernumgebungen unterscheiden sich einerseits in der Darstellung der Abläufe. Es gibt prinzipiell drei verschiedene Gestaltungsweisen: Text-Bild-Kombinationen, Text-Animation-Kombinationen und Simulationen. Des Weiteren unterscheiden sich die Navigationen der Lernumgebungen. Während die Standbild- und Animationsversion einen sequenziellen, linear strukturierten Aufbau haben, überwiegen bei den Simulationen naturgemäß die explorativen, hyperlinkartig vernetzten Elemente in der Navigation. Der folgende Abschnitt zeigt zunächst eine vergleichende Übersicht über die Lernumgebungen der Studie 2 (Atmungskette). Danach werden die unterschiedlichen Varianten ausführlich vorgestellt und weiter präzisiert.

3.1.1 Vergleichende Übersicht für die Lernumgebungen in Studie 2

Lernumgebung	Standbild	Animation	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2
Visualisierung der Lerninhalte	<ul style="list-style-type: none"> • Stehende Bilder 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen
Verbalisierung der Lerninhalte	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterungstexte zu bildlichen Darstellungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterungstexte zu bildlichen Darstellungen 	-	-
Weitere Elemente in der Lernumgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten
Struktur der Lernsequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • inhaltliche Sequenzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • inhaltliche Sequenzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertext mit linearen Abschnitten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertext mit linearen Abschnitten
Hilfe zur Strukturierung der Lernumgebung	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Lineare Anordnung der Abschnitte ist durch die Reihenfolge der gestellten Aufgaben festgelegt (obligatorisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lineare Anordnung der Abschnitte ist durch die Reihenfolge der gestellten Aufgaben festgelegt (obligatorisch) • Handbuch mit Leitfaden zur Bearbeitung der Simulation
Hilfen zur Bearbeitung der Aufgaben	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Explizite Hinweise auf auszuwählende Parameterkombinationen (Handbuch) • Protokollfelder im Handbuch
Hilfe zu den Lernkontrollfragen	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Hinweise auf auszuwählende Parameter oder Parameterkombinationen (Handbuch) • Hinweise auf nachzulesende Stichworte im Glossar des Handbuchs

3.1.2 Lernumgebung 1: Standbild

Die Prozesse der Atmungskette werden hier durch stehende Bilder dargestellt. Teilchen- und Molekülbewegungen sind in den Abbildungen durch Bewegungsindikatoren (Pfeile) symbolisiert. Zu den Bildern können über dafür vorgesehene Buttons kurze Erklärungstexte abgerufen werden. Der Gesamttablauf der Atmungskette wird in dieser Lernumgebung in vier Abschnitte gegliedert. Hinzu kommt ein einleitender Abschnitt und ein weiterer, der das zusätzliche Arbeitsmaterial enthält.

Gliederung der Lernumgebung 1 (Standbild)

- Abschnitt 1: Problematisierung der biologischen Oxidation von $\text{NADH}+\text{H}^+$
Der Abschnitt enthält ein kurzes Multiple-Choice-Quiz zur Selbstüberprüfung mit Rückmeldung richtig / falsch in Abhängigkeit der gegebenen Antwort.
- Abschnitt 2: Elektronen- und Protonentransport am Komplex I
Dieser Abschnitt enthält eine Darstellung der inneren Mitochondrienmembran und des Weiteren drei anschließende Lernkontrollfragen¹².
- Abschnitt 3: Elektronen- und Protonentransport an den Komplexen III und IV
Der Abschnitt enthält eine Lernkontrollfrage.
- Abschnitt 4: Oxidation eines zweiten $\text{NADPH}+\text{H}^+$ mit Wasserbildung am Komplex IV
Des Weiteren werden in diesem Abschnitt die Entstehung des Protonengradienten und des Membranpotentials durch die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport besprochen (s. Abbildung VI-1). Mit einer Lernkontrollfrage.
- Abschnitt 5: ATP-Synthese
Mit drei Lernkontrollfragen.
- Abschnitt 6: Zusatzmaterial
In diesem Abschnitt werden die Oxidation von FADH_2 an der Succinatdehydrogenase und der dazugehörige weiterer Elektronen- und Protonentransport beschrieben. Mit zwei Lernkontrollfragen.

Am Ende eines jeden Abschnitts wird eine Seite angezeigt, die eine Wiederholung der bisher bearbeiteten Sequenzen offeriert. Die Buttons auf dieser Seite ermöglichen den Sprung zum Anfang jedes bisher bearbeiteten Abschnitts, um eine zeitaufwendige Navigation durch Zurückblättern zu vermeiden.

Als ergänzendes Arbeitsmaterial zur computergestützten Lernumgebung wurde eine Tischvorlage an den Arbeitsplätzen ausgelegt (s. IX 5.2). Diese enthielt eine schematische Darstellung des Mitochondriums mit einem Ausschnitt aus der inneren Mitochondrienmembran sowie eine Zeichenerklärung. Eine weitere Seite war für persönliche Notizen der Versuchspersonen vorgesehen.

Erläuterungen zum Abschnitt 4 der Standbildversion

Abbildung VI-1 repräsentiert die inhaltliche Feingliederung des Abschnitts 4. Die Abbildung ist zeilenweise zu lesen. Ausgehend von den Bildseiten in der linken Spalte, erhält man die zusätzlichen Erklärungstexte (s. Spalte rechts in Abbildung VI-1) durch Mausklick auf den jeweiligen ?-Button.

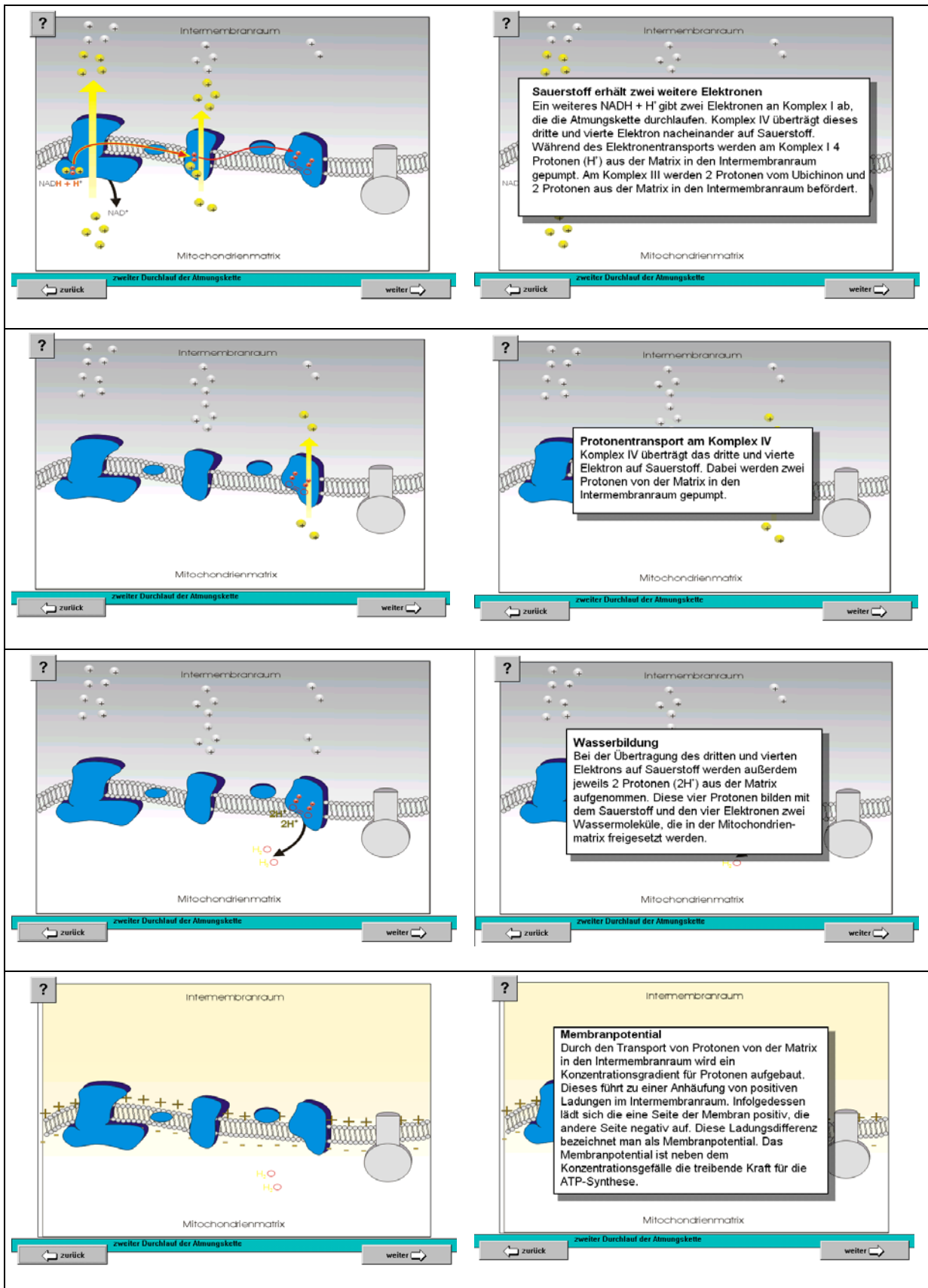


Abbildung VI-1: Text-Bild-Kombinationen des vierten Abschnitts in der Standbildversion zur Atmungskette.

3.1.3 Lernumgebung 2: Animation

Anstelle von stehenden Bildern mit Pfeilen als Bewegungsindikatoren werden in dieser Version animierte Darstellungen der Transportprozesse an der inneren Mitochondrienmembran gezeigt. Die Animationsversion ist ebenfalls in sechs Abschnitte gegliedert, die inhaltlich denen der Standbildversion entsprechen. Auch die inhaltliche Feingliederung eines Abschnitts erfolgte analog zur Standbildversion. Zu den animierten Darstellungen können entsprechend dieselben Lehrtexte wie in der Standbildversion abgerufen werden. Die Animationsversion wurde darüber hinaus um dieselbe Tischvorlage ergänzt wie die Standbildversion.

3.1.4 Lernumgebung 3: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1

Die Lernumgebung 3 dieser Studie unterscheidet sich durch ihren Aufbau wesentlich von den beiden bereits vorgestellten Lernumgebungen. Durch Simulationen sollen Lernende aufgefordert werden, sich die Inhalte eigenständig und explorativ zu erarbeiten. Entsprechend wurde hier von einer expliziten inhaltlichen Sequenzierung der Lerninhalte wie bei Standbild- und Animationsversion abgewichen. Die Simulation zur Atmungskette ist zwar durch einen vorgegebenen Rahmen linear strukturiert, enthält aber zahlreiche hyper-textartige Elemente. Dieser linear strukturierte Rahmen der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ gliedert sich in mehrere Abschnitte (s.u. „Gliederung der Lernumgebung 3“). Beginnend mit einer inhaltlichen Einführung in das Thema „Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran“ werden daraufhin die technischen Details der Simulation, wie z. B. ihre Auswahlmöglichkeiten, erläutert. Daran schließen sich mehrere simulationsspezifische Aufgabenstellungen an, die von den Lernenden mit Hilfe der Simulation obligatorisch und nacheinander bearbeitet werden müssen.

Die hier gewählte Form der Aufgabenbearbeitung in der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ erfüllt zwei wesentliche Funktionen im Hinblick auf die instruktionale Unterstützung.

1. Die Aufgaben treffen eine *Vorauswahl der relevanten Lerninhalte*, fokussieren die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die wesentlichen Zusammenhänge im dargestellten System. Sie fungieren damit als *implizite inhaltliche Hilfestellung*, indem sie dem Lerner verdeutlichen, was elementare Abläufe des Systems sind (Prechtel & Nerdel, 2002).
2. Die verpflichtende Aufgabenbearbeitung in der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ in der *vorgegebenen Reihenfolge* ersetzt die explizite inhaltliche Sequen-

zierung der Lerninhalte in Standbild- und Animationsversion. Sie stellt *eine zusätzliche instruktionale Unterstützung strategischer Art* beim Arbeiten mit Simulationen dar.

Im Sinne der erstgenannten Funktion werden Aufgaben zur Bearbeitung der Simulationen in der Studie 2 (Atmungskette) als eine notwendige den Lernprozess unterstützende Maßnahme verstanden. Aufgaben stellen damit die minimalste Variante der instruktionalen Hilfestellung dar und werden infolgedessen in beiden Simulationen dieser Studie angeboten. Die obligatorische Aufgabenbearbeitung ist dagegen im Sinne der zweiten Funktion eine zusätzliche instruktionale Hilfestellung. Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau und die Lerninhalte der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ weiter konkretisiert.

Gliederung der Lernumgebung 3

- Abschnitt 1:

Einleitende Problematisierung der biologischen Oxidation von $\text{NADH} + \text{H}^+$ mit kurzem Multiple-Choice-Quiz zur Selbstüberprüfung (identisch mit dem einleitenden Abschnitt von Standbild- und Animationsversion)

- Abschnitt 2:

Darstellung des Aufbaus der inneren Mitochondrienmembran, Erläuterungen zum Aufbau des Startscreens und zu den Auswahlmöglichkeiten der Simulation (s. Abbildung VI-2 bis Abbildung VI-5)

- Abschnitt 3:

Erste Aufgabe zur Bearbeitung der Simulation mit anschließender Multiple-Choice-Frage. Im Anschluss an die Aufgabe werden fünf Lernkontrollfragen zum Ablauf der Simulation gestellt, die identisch in der Standbild- und Animationsversion abgefragt wurden. Allerdings weicht die Reihenfolge der Fragestellungen in der Simulationsversion von derjenigen in den anderen beiden Versionen ab, da eine Abstimmung mit den Aufgaben zur Simulation vorgenommen werden musste.

- Abschnitt 4:

Zweite Aufgabe zur Bearbeitung der Simulation. Die weitere Untergliederung dieses Abschnitts erfolgt analog zum Abschnitt 3. Zur Lösung der zweiten Aufgabe ist ein Eingabefeld vorgesehen, bei dem die eingegebene Antwort auf einer Diskette gespeichert wird. Eine Lernkontrollfrage wird im Anschluss an die Beantwortung der Aufgabe gestellt.

- Abschnitt 5:

Dritte Aufgabe zur Bearbeitung der Simulation. Die weitere Untergliederung des Abschnitts ist wie diejenige in den Abschnitten 3 und 4. Zur Aufgabenlösung werden ebenfalls Eingabefelder mit Speicherfunktion appliziert. Abschließend folgen drei Lernkontrollfragen.

- Abschnitt 6:

Zusatzmaterial (identisch mit dem Material in Standbild- und Animationsversion)

Am Ende eines jeden Abschnitts wird auch in dieser Lernumgebung eine Seite angezeigt, die eine Wiederholung der bisher bearbeiteten Sequenzen offeriert. Die Buttons auf dieser Seite ermöglichen den Sprung zum Anfang jedes bisher bearbeiteten Abschnitts, um eine zeitaufwendige Navigation durch Zurückblättern zu vermeiden. Für die Bearbeitung der Simulation wurde zusätzlich dieselbe Tischvorlage mit schematischen Abbildungen und Zeichenerklärungen ausgeteilt wie bei der Standbild und der Animationsversion.

Zur Konkretisierung dieser Lernumgebung werden im Folgenden die Abschnitte 2 und 3 der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ ausführlich dargestellt und näher erläutert.

Erläuterungen zum Abschnitt 2 der Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1

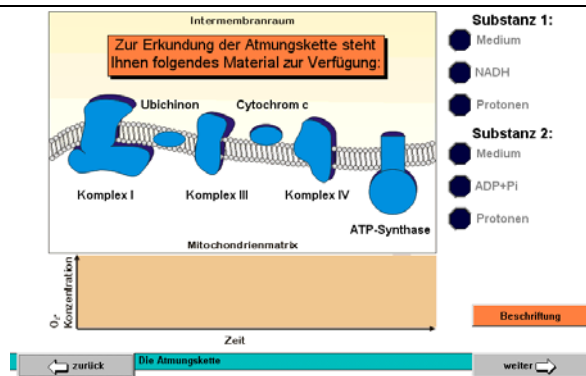


Abbildung VI-2: Startscreen der Simulation mit Darstellung der inneren Mitochondrienmembran

Abbildung VI-2 zeigt den Startscreen der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ der Studie 2 (Atmungskette). Auf dieser Bildschirmseite werden die Komponenten der inneren Mitochondrienmembran vorgestellt, die an der Atmungskette und der ATP-Synthase beteiligt sind. Über den orangen Button „Beschriftung“ (unten rechts im Bild) können weitere Erklärungen zum Startscreen abgerufen werden (s. hierzu Abbildung VI-3, Abbildung VI-4 und Abbildung VI-5.)

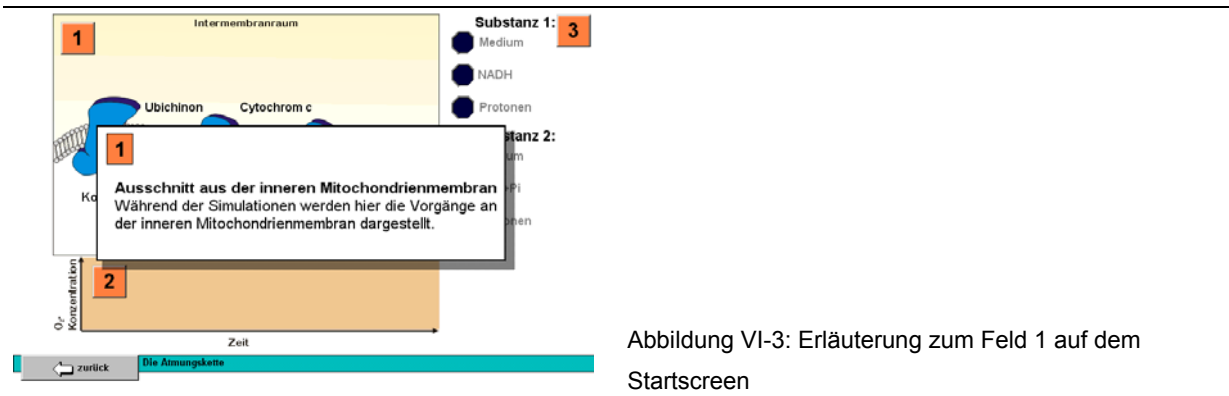


Abbildung VI-3: Erläuterung zum Feld 1 auf dem Startscreen

Über den orangenen Button „Beschriftung“ auf dem Startscreen gelangt man zu einer Erläuterungsseite (Abbildung VI-3), über die weitere Informationen zu den Elementen der Startseite in Erfahrung gebracht werden können. Beim Anklicken des orangenen Button „1“ wird ein Erläuterungstext angezeigt, der die Funktion desjenigen Feldes erklärt, in dem die innere Mitochondrienmembran bildlich dargestellt ist.

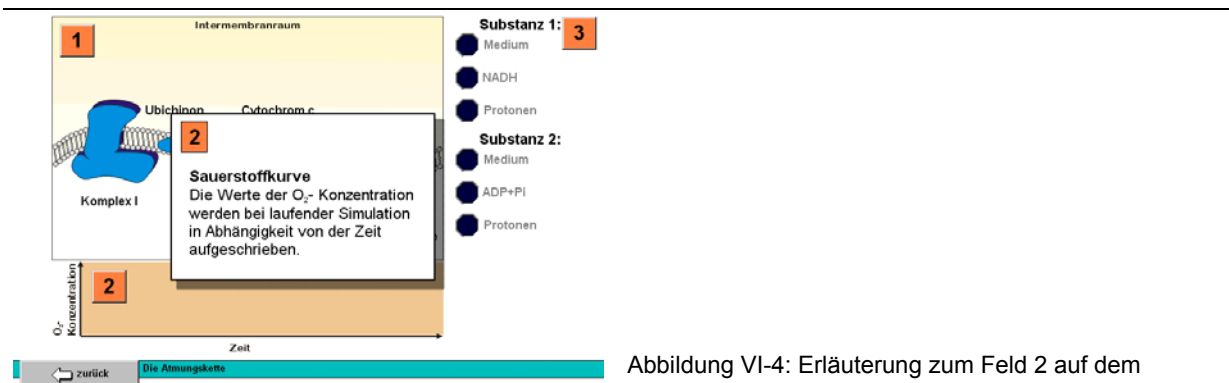


Abbildung VI-4: Erläuterung zum Feld 2 auf dem Startscreen

Ebenso kann man durch Anklicken des orangenen Button „2“ und „3“ weitere Erklärungen zu den jeweiligen Feldern einholen (s. Abbildung VI-4 und Abbildung VI-5). Zum Steuerfeld (Abbildung VI-5) erhält der Benutzer zusätzliche erläuternde Anmerkungen zu den Auswahlmöglichkeiten der Simulation.

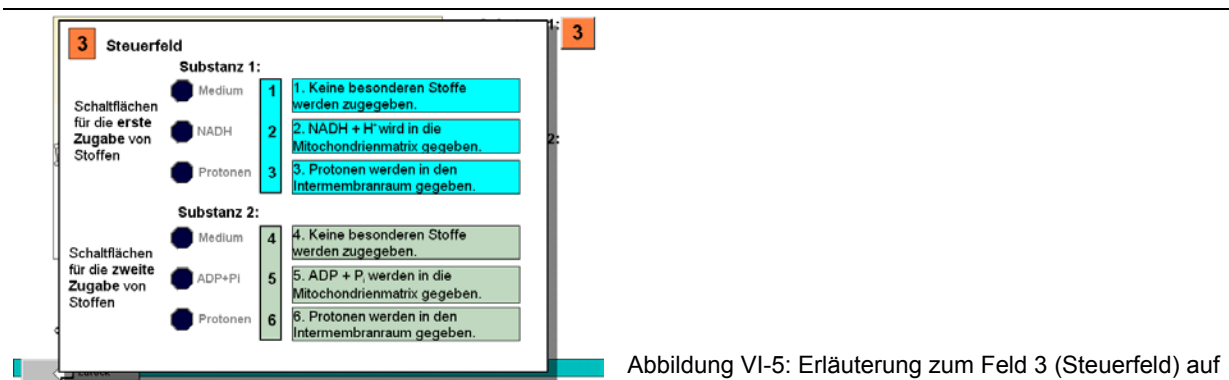


Abbildung VI-5: Erläuterung zum Feld 3 (Steuerfeld) auf dem Startscreen

Erläuterungen zum Abschnitt 3 der Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1

Durch die Atmungskette wird Sauerstoff verbraucht. Der Sauerstoffverbrauch zeigt an, wie effektiv die Atmungskette abläuft.

Erste Aufgabe

Probieren Sie in der Simulation "Die Atmungskette" aus, durch welche Zugaben aus dem Steuerfeld der bestmögliche Ablauf der Atmungskette gewährleistet ist.



Abbildung VI-6: Erste Aufgabenstellung in der Simulation zur Atmungskette

Abbildung VI-6 zeigt die Seite der Simulation 1, die dem Benutzer die erste Aufgabenstellung zur Bearbeitung präsentiert. Der Benutzer erhält über die Buttons die Optionen, entweder die Aufgabe sofort zu lösen (Button „Erste Aufgabe lösen“ unten rechts) oder sie mit Hilfe der Simulation zu bearbeiten (Button „zur Simulation“ unten rechts). Entscheidet er sich, die Aufgabe mithilfe der Simulation zu bearbeiten, wird er auf der folgenden Seite aufgefordert, eine erste Substanz auszuwählen (s. Abbildung VI-7).

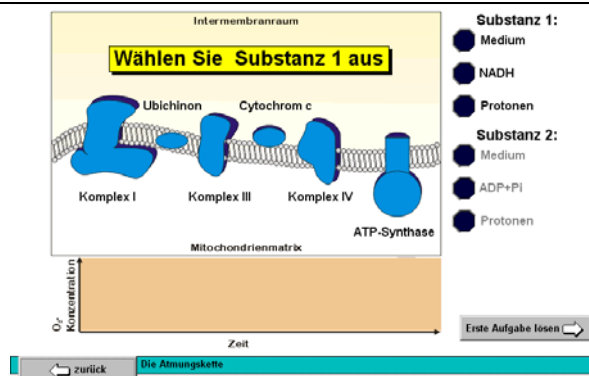


Abbildung VI-7: Erste Auswahlseite der Simulation

Als Substanz 1 kann der Benutzer „Medium“, „NADH“ oder „Protonen“ auswählen. In Abhängigkeit von der getroffenen Auswahl wird der entsprechende Prozess an der inneren Mitochondrienmembran dargestellt. Im Feld 2 unterhalb der Membrandarstellung wird parallel zum Ablauf an der inneren Mitochondrienmembran die Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet. Exemplarisch wurde hier als Substanz 1 „NADH“ ausgewählt (s. Abbildung VI-8). Bei dieser Auswahl wird das Substrat $\text{NADH} + \text{H}^+$ oxidiert, Elektronen- und Protonentransport laufen an der inneren Mitochondrienmembran ab. Die Protonen reichern sich im Intermembranraum an, Wasser wird als Produkt der Oxidation in die Mitochondrienmembran abgegeben. Nachdem die Oxidation von zwei Molekülen $\text{NADH} + \text{H}^+$ mit der Bildung von zwei Molekülen Wasser abgeschlossen ist, wird der Benutzer aufgefordert, eine zweite Substanz auszuwählen (s. Abbildung VI-8).

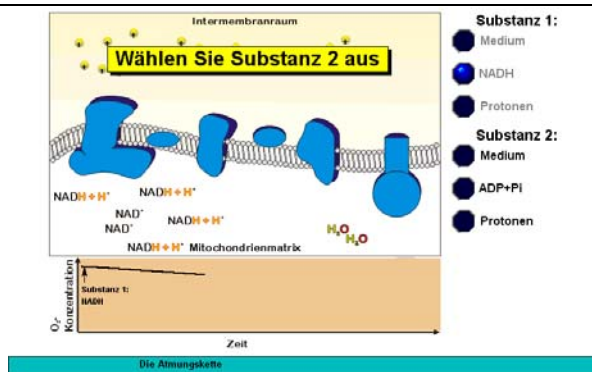


Abbildung VI-8: Beispiel für eine zweite Auswahlseite der Simulation

Diese zweite Seite wurde gezeigt, nachdem NADH als erste Substanz ausgewählt worden ist.

In Abhängigkeit von der zweiten Auswahl wird der Ablauf an der inneren Mitochondrienmembran fortgeführt. Als Beispiel wurde hier $\text{ADP} + \text{P}_i$ als Substanz 2 ausgewählt (s. Abbildung VI-9). Durch die Zugabe dieser Substanz wird der Protonengradient über der inneren Mitochondrienmembran dezimiert, so dass die Atmungskette wieder verstärkt ablaufen kann. Dies kann an einem vermehrten Sauerstoffverbrauch pro Zeiteinheit abgelesen werden.

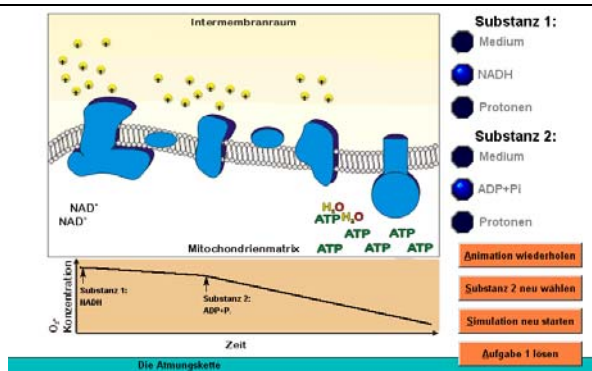
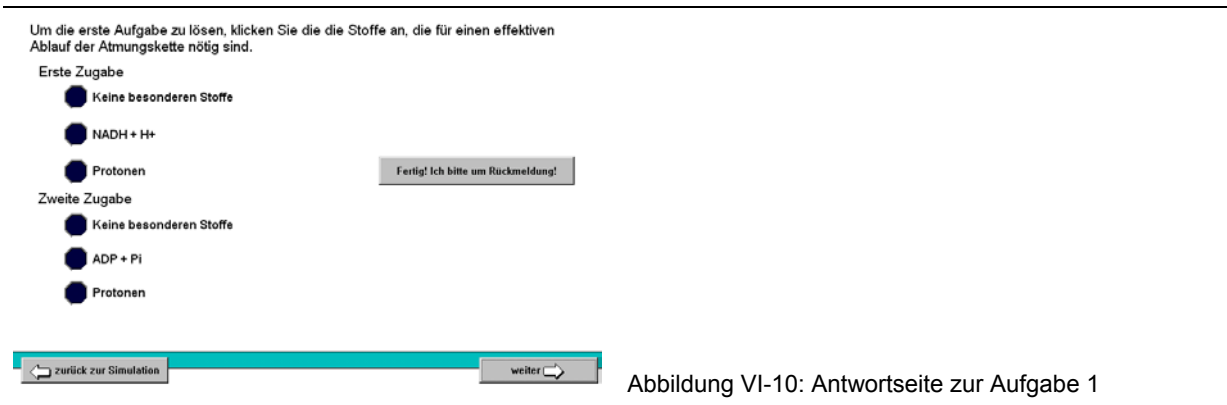


Abbildung VI-9: Auswahloptionen nach Ablauf der Darstellung an der inneren Mitochondrienmembran für die ausgewählte Substanz 2

Nachdem die Animation entsprechend der ersten und zweiten Auswahl abgelaufen ist, werden dem Benutzer verschiedene Optionen angeboten (s. Abbildung VI-9, orange Buttons unten rechts im Bild). Bei Klick auf den Button „Animation wiederholen“ wird die Animation entsprechend der zweiten Auswahl erneut gezeigt. Der Button „Substanz 2 neu wählen“ ermöglicht die Auswahl einer neuen zweiten Substanz in Abhängigkeit von der ersten ausgewählten Substanz. Die Option „Simulation neu starten“ führt den Benutzer zurück zur ersten Auswahl (s. Abbildung VI-7). Wird „Aufgabe 1 lösen“ angeklickt, gelangt der Benutzer vorwärts zur Antwortseite der Aufgabe 1 (s. Abbildung VI-10).



Als richtige Lösung der Aufgabe 1 (s. Abbildung VI-10) müssen hier die Kontrollfelder „NADH+H⁺“ für die erste Zugabe und „ADP+P_i“ für die zweite Zugabe gewählt werden. Über den Button „Fertig! Ich bitte um Rückmeldung!“ (rechts im Bild) erhält der Lerner ein Feedback zu seiner getroffenen Auswahl. Bei falscher Beantwortung wird die Versuchsperson aufgefordert, die Aufgabe abermals mit der Simulation zu bearbeiten.

3.1.5 Lernumgebung 4: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2

Die Lernumgebung 4 ist identisch mit der Lernumgebung 3. Zusätzlich zum computerbasierten Lernmaterial wurde ein Handbuch mit instruktionalen Hilfestellungen (s. IX 5.2) zur Simulation ausgeteilt, die wesentlich umfangreicher gestaltet waren als die ergänzende Tischvorlage der bisher besprochenen Lernumgebungen. Das Handbuch „Schritt für Schritt – Simulation „Die Atmungskette““ enthielt sowohl inhaltliche sowie ergänzende strategische Hinweise zur Bearbeitung der Simulation. Neben den schematischen Darstellungen von Mitochondrium und der inneren Mitochondrienmembran sowie den Zeichenerklärungen, enthielt es ein umfangreiches Glossar mit Erläuterungen als inhaltliche Hilfestellung.

Die strategischen Hinweise in Form eines Leitfadens dienten der Benutzerführung durch die Simulation. Hier wurden explizite Hilfen gegeben, welche Parameterkombinationen zur Darstellung derjenigen Prozesse an der inneren Mitochondrienmembran führen, die die Lösung einer Aufgabe beinhalten. Weiterhin wurden implizite Hinweise zum erfolgreichen Bearbeiten der Lernkontrollfragen erteilt. Als solch impliziter Hinweis wurde den Versuchspersonen z. B. eine Parameterkombination suggeriert, die die Lösung der Lernkontrollfrage beinhaltet. Ferner wurden sie auf ein Stichwort im Glossar des Handbuches aufmerksam gemacht, aus dem sich eine korrekte Antwort zur Frage ableiten ließ.

3.2 Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen

An der zweiten Studie haben insgesamt 131 Schülerinnen und Schüler aus den Kursen der ausgesuchten Gymnasien und Gesamtschulen teilgenommen. Die 131 Teilnehmerinnen und Teilnehmer waren derart auf die vier Experimentalgruppen der Studie 2 verteilt, dass die beiden Simulationsexperimentalgruppen etwas stärker besetzt waren als die Experimentalgruppe „Standbild“ und „Animation“ (zur Randomisierung s. IV 3.2). Dies geschah im Hinblick auf Studie 3: Dort sollte eine dritte Simulationsgruppe eingeführt werden. Die Teilnehmer an dieser künftigen Simulationsgruppe sollten auch zuvor mit einer Simulation gearbeitet haben, um die Stichprobenzahlen in der Standbild- und Animationsgruppe sowie der Simulationsgruppen im Hinblick auf die langfristige Vergleichbarkeit nicht unnötig zu dezimieren. Damit sollte die Bewertung von langfristigen Effekten zwischen den Studien für die Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ sowie einschränkend für die verschiedenen Simulationen noch möglich sein. Angestrebt wurde eine Besetzung der Experimentalgruppen von $N \geq 30$ Versuchspersonen. Dies konnte für die beiden Simulationsgruppen tatsächlich umgesetzt werden. Die Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ liegen knapp unter der angestrebten Personenhäufigkeit. Die genaue Besetzung der Experimentalgruppen zeigt Tabelle VI-1.

Tabelle VI-1: Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen in Studie 2 (Atmungskette)

Lernumgebung	Experimentalgruppe	N
1	Standbild	28
2	Animation	27
3	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	39
4	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	37
Summe:		131

3.3 Die Erhebungsinstrumente

Nachfolgend werden die Besonderheiten der in dieser Studie verwendeten Fragebögen und ihre deskriptiven Kennwerte vorgestellt. Die vollständigen Fragebögen, die in der Studie 2 verwendet wurden, befinden sich im Anhang (s. IX 6).

3.3.1 Vortest

In der Tabelle VI-2 sind die Reliabilitäten und die deskriptiven Statistiken für die Skalen des Vortests der Studie 2 zusammengefasst. So erreichen die Skalen zur Erfassung der individuellen Lernerkmale zufriedenstellende bis gute Reliabilitäten. Das themenspezifische Wissen wurde im Vortest mit fünf Items zum Faktenwissen (Items 1-7) und acht Items zum Verständnis (Items 8-13) überprüft. Diese Kenntnisse bezüglich der Atmungskette wurden von den Probanden durch Aufgaben mit Antworten im Singel-Choice-Format erfasst; d. h. zu einem Item wurden jeweils vier Antworten vorgegeben, von denen nur eine richtige Antwort anzukreuzen war. Die Reliabilität des themenspezifischen Wissens im Vortest liegt mit Cronbachs Alpha = 0,33 jedoch unterhalb des befriedigenden Bereichs.

Tabelle VI-2: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Vortests in Studie 2

Variable	Skala	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
Computerkenntnisse	Computerinteresse	4	6,41	3,16	0,88
	Computerwissen	4	4,43	2,79	0,79
verbale Lernpräferenz	guter sprachlicher Ausdruck	4	7,94	2,67	0,84
	Lesekompetenz	2	4,37	1,51	0,76
visuelle Lernpräferenz	gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen	4	5,80	3,03	0,92
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	13	2,74	1,70	0,33

3.3.2 Nachtest

In der Tabelle VI-3 sind die deskriptiven Statistiken und Reliabilitäten für den Nachtest der Studie 3 zusammengestellt. Die Skalen zur Messung der kognitiven Belastung und des Interesses erreichten gute Reliabilitäten, während diejenige der Skala „Aufmerksamkeit“ gerade noch als zufriedenstellend zu bewerten ist. Die themenspezifischen Kenntnisse zur Atmungskette wurden im Nachtest anhand derselben dreizehn Items wie im Vortest überprüft, wobei wiederum die Items 1-7 das Faktenwissen und die Items 8-13 das Verständnis zu den Vorgängen an der inneren Mitochondrienmembran testeten. Die Reliabilität des Wissenstests fällt wie im Vortest mit Cronbachs Alpha = 0,32 sehr gering aus.

Tabelle VI-3: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Nachtests in Studie 2

Variable	Skala	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
	Kognitive Belastung	8	16,75	5,87	0,88
	Aufmerksamkeit	2	3,97	1,82	0,67
	Interesse	5	6,74	4,44	0,86
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	13	6,09	1,99	0,32

3.3.3 Diskussion der Kennwerte der Erhebungsinstrumente

In der Studie 2 fallen die geringen Reliabilitäten der beiden Wissenstest unter Umständen nur wenig ins Gewicht, da hier die grundsätzlichen Probleme der Veränderungsmessung bestehen. Selbst bei großen Reliabilitäten der Einzelmessungen und einer großen Korrelation zwischen den beiden Skalen, können die Reliabilität des Differenzmaßes bei der Veränderungsmessung nur ein Bruchteil der beiden ursprünglichen Reliabilitäten (Rost, 1996) betragen. In der Studie 2 wurde als abhängige Variable das Differenzmaß der beiden Skalen des Nach- und des Vortest zur Messung des Lernerfolgs verwendet (s. IV 4.1.2). Die Reliabilitäten der beiden Einzelskalen sind daher nur bedingt aussagekräftig und demzufolge ausschließlich der Vollständigkeit halber aufgeführt.

4 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie 2 dargestellt. Im Abschnitt 4.1 werden die Daten deskriptiv präsentiert. Der Abschnitt 4.2 ist den Ergebnissen der Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen gewidmet. Der Abschnitt 4.3 legt die Ergebnisse der Datenanalyse mit probabilistischen Testmodellen dar. Im Abschnitt 4.4 werden die Forschungshypothesen wiederholt überprüft, wobei die Treatmentvergleiche hier auf der Basis eines latenten Klassenmodells vorgenommen wurden. Der Abschnitt 4.5 bietet eine vergleichende Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Studie 2.

4.1 Deskriptive Statistik

4.1.1 Häufigkeiten der Summenscores in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis

Sowohl im Vortest als auch im Nachtest dieser Studie wurden zu jedem Item jeweils vier Antworten angeboten, von denen stets die eine richtige anzukreuzen war (s. IX 6.6). Eine richtige Antwort wurde mit einem Punkt bewertet. Damit konnten in der Kategorie Faktenwissen (Items 1-7, s. IX 6) maximal 7 Punkte jeweils in Vor- und Nachtest erreicht werden. Um das Verständnis der Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran und das Verständnis ihrer kausalen Zusammenhänge zu überprüfen, wurden zusätzlich 6 Transferaufgaben in Vor- und Nachtest gestellt (Items 8-13, s. IX 6). Damit konnten in der Kategorie Verständnis maximal 6 Punkte erreicht werden.

86% der Versuchspersonen erreichen im Faktenwissen des Vortests lediglich zwischen 0 bis 2 Punkte. Die verbleibenden 14% erzielen 3 bis 4 Punkte in dieser Kategorie. Die maximalen Personenhäufigkeiten treten damit im unteren Drittel der Spannweite auf, während keine der Versuchspersonen Scores im oberen Drittel oder gar die maximale Punktzahl von 7 Punkten erreicht (s. Abbildung VI-11). Die Faktenwissenitems erweisen sich damit für die gesamte Stichprobe als zu schwierig, da das Vorwissen hinsichtlich der Fakten beim Thema Atmungskette eher schwach ausgeprägt ist. Dies wird im Hinblick auf die Operationalisierung des themenspezifischen Vorwissens zu diskutieren sein.

Im Nachtest konnten die Versuchspersonen ihre Summenscores im Faktenwissen erheblich verbessern. Nur noch 17% erzielen Punktesummen von 0 bis 2 Punkten in der Kategorie Faktenwissen, 63% erreichen 3 bis 5 Punkte, 20% der Versuchspersonen erhalten sogar Scores im obersten Drittel. Diese Verteilung belegt, dass die Items erst im Nachtest ein

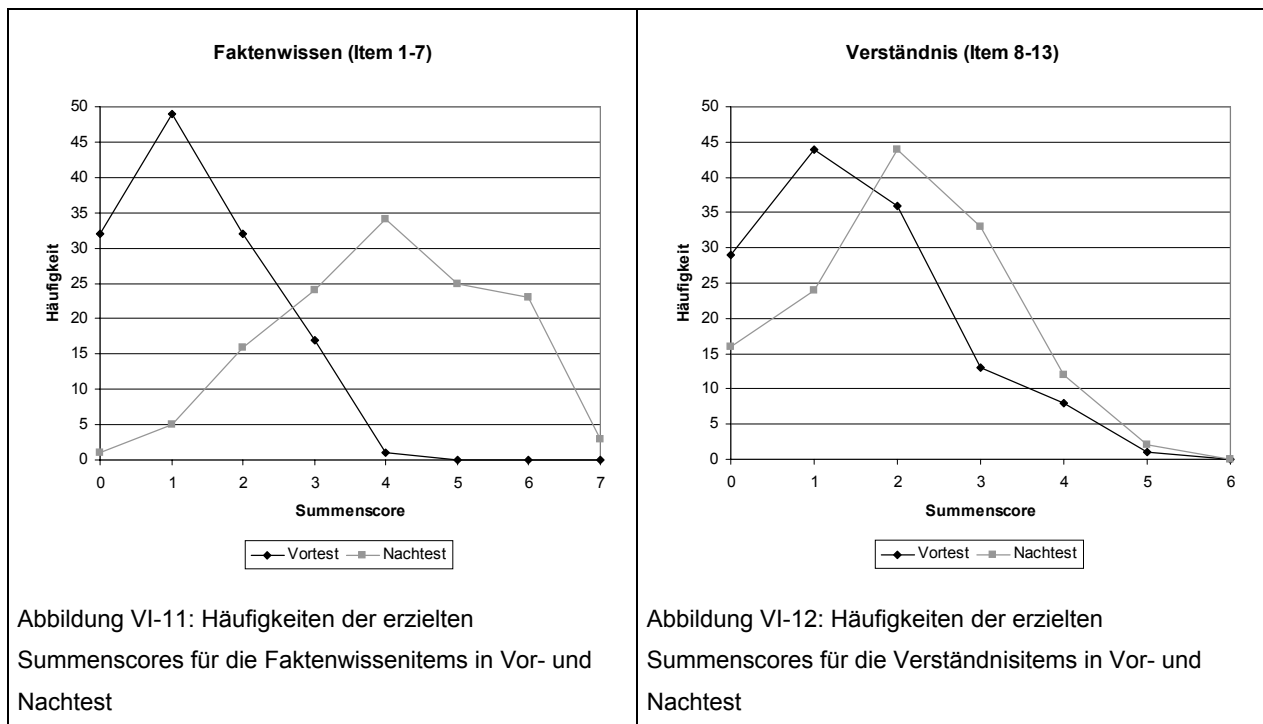
adäquates Schwierigkeitsniveau hatten, ohne dabei für die Mehrheit zu leicht zu werden. Die Stichprobe konnte damit ihr Faktenwissen durch die computergestützte Lernsitzung erheblich verbessern.

Bei den Häufigkeitsverteilungen der Summenscores für die Verständnisitems des Vor- und Nachtests können dagegen nicht so starke Veränderungen konstatiert werden (s. Abbildung VI-12). Die beiden Kurven sind von nahezu identischer Gestalt; die Kurve des Nachtest ist lediglich um einen Punkt nach rechts verschoben. Im Vortest werden von 83% der Stichprobe lediglich 0 bis 2 Punkte in der Kategorie Verständnis erzielt. Dieser Anteil verringert sich im Nachtest; hier erhalten nur noch 64% der Stichprobe Punktesummen von 0 bis 2. Entsprechend erreichen 17% im Vortest Scores von 3 bis 5 Punkten. Im Nachtest gelingt es dagegen 36% der Stichprobe, einen Summenscore im Bereich von 3 bis 5 Punkten zu erzielen. Bemerkenswert ist des Weiteren, dass weder im Vor- noch im Nachtest die maximale Punktzahl von einer Versuchsperson erreicht wird.

Diese Tatsache zusammen mit den geringen Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung in der Kategorie Verständnis deutet darauf hin, dass die Items für den Wissensstand der Stichprobe sowohl im Vortest als auch im Nachtest zu schwer waren. Ganz offensichtlich waren diese Items zu komplex konzipiert und überschritten dadurch ein angemessenes Schwierigkeitsniveau. Tabelle VI-4, Abbildung VI-11 und Abbildung VI-12 zeigen alle Ergebnisse im Detail.

Tabelle VI-4: Häufigkeiten der erzielten Summenscores differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Faktenwissen (Item 1-7)			Verständnis (Item 8-13)		
Summenscore	Häufigkeit Vortest [N]	Häufigkeit Nachtest [N]	Summenscore	Häufigkeit Vortest [N]	Häufigkeit Nachtest [N]
0	32	1	0	29	16
1	49	5	1	44	24
2	32	16	2	36	44
3	17	24	3	13	33
4	1	34	4	8	12
5	0	25	5	1	2
6	0	23	6	0	0
7	0	3			



4.1.2 Häufigkeiten der Zuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis

In dieser Studie werden Lernzuwächse in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis durch das Differenzmaß ihrer Punktesummen (Summenscores) in Nach- und Vortest bestimmt (s. IV 4.1.2). Durch diese Vorgehensweise resultieren gelegentlich negative Lernzuwächse, wenn die Vortestergebnisse besser ausfielen als diejenigen im Nachtest (s. Tabelle VI-5).

Abbildung VI-13 stellt die Personenhäufigkeiten in Abhängigkeit der erreichten Zuwächse in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis dar. Die beiden Verteilungen sind in ihrer Spannweite und ihren Maxima vergleichbar. Dabei befindet sich das Maximum der Häufigkeitsverteilung für den *Zuwachs Faktenwissen* rechts von dem des *Zuwachs Verständnis*. Entsprechend werden die größten Personenhäufigkeiten im Faktenwissen bei Zuwächsen von 2 bis 4 Punkten erreicht, 65% der Stichprobe erreichen einen Zuwachs im Faktenwissen in dieser Größenordnung. 24% aller Versuchspersonen erzielen kleinere Zuwächse in dieser Kategorie, 11% der Stichprobe können größere Zuwächse erlangen. In der Kategorie Verständnis liegen die Zuwächse, die am häufigsten erzielt werden, dagegen zwischen 0 und 2 Punkten. Dies betrifft 66% der Stichprobe. 24% weisen negative Lernzuwächse auf. Zuletzt erreichen 10% der Stichprobe Lernzuwächse die größer als 3 Punkte sind.

Tabelle VI-5: Differenzen der Summenscores aus Nachttest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis

Score	Zuwachs Faktenwissen	Zuwachs Verständnis
-4	0	1
-3	0	2
-2	0	10
-1	2	19
0	8	29
1	22	29

Score	Zuwachs Faktenwissen	Zuwachs Verständnis
2	24	28
3	26	11
4	35	2
5	10	0
6	3	0
7	1	0

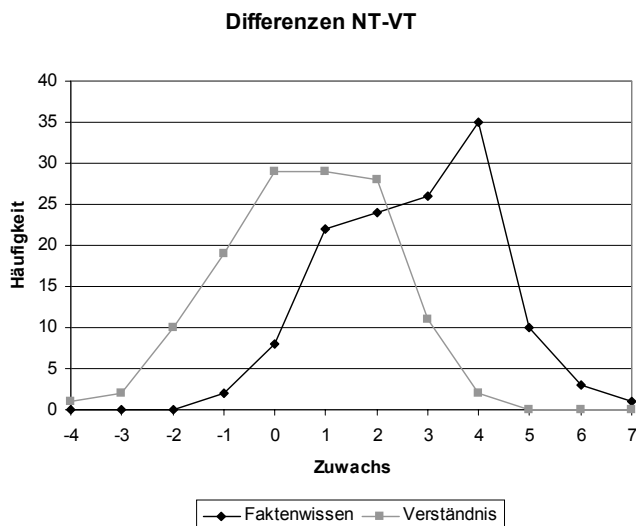


Abbildung VI-13: Häufigkeiten der errechneten Differenzen der Summenscores aus Nachttest und Vortest (Zuwachs) für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis

4.1.3 Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachttestergebnisse und ihre Differenzwerte

In dieser Studie beträgt der mittlere *Lernzuwachs* *gesamt* 3,34 Punkte. Davon entfallen 2,76 Punkte auf den Zuwachs im Faktenwissen und nur 0,59 Punkte dagegen auf den Zuwachs in der Kategorie Verständnis. Im Faktenwissen des Vortests wird ein Mittelwert von 1,28 Punkten erzielt. Dieses Ergebnis verbessert sich im Nachttest auf 4,04 Punkte. Wenn auch an diesen Ergebnissen deutlich wird, dass die Items im Vortest von den Personen nur mit Schwierigkeiten beantwortet werden konnten, so ist doch der Lernerfolg in dieser Kategorie offensichtlich. Beim Verständnis ist die Veränderung wie bereits beschrieben äußerst gering.

Sie verbessert sich lediglich von 1,47 Punkte (Mittelwert im Vortest) auf 2,05 Punkte (Mittelwert im Nachtest). Dass die Kategorie Verständnis ohne deutliche Verbesserung bleibt, unterstreicht abermals die offensichtlichen Schwierigkeiten bei der Bearbeitung ihrer Items. Diese Ergebnisse liefern erste Hinweise dafür, dass sich der Lernerfolg der Stichprobe überwiegend auf das Faktenwissen erstreckt. Tabelle VI-6 und Abbildung VI-14 stellen die Ergebnisse im Detail dar.

Tabelle VI-6: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte

		N	M	SD	Min	Max	Spannweite
Vortest	Summenscore gesamt (Item 1-13)	131	2,75	1,70	0	7	7
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-7)	131	1,28	1,00	0	4	4
	Summenscore Verständnis (Item 8-13)	131	1,47	1,17	0	5	5
Nachtest	Summenscore gesamt (Item 1-13)	131	6,09	1,99	1	11	10
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-7)	131	4,04	1,50	0	7	7
	Summenscore Verständnis (Item 8-13)	131	2,05	1,20	0	5	5
Differenz NT-VT	Lernzuwachs gesamt (Item 1-13)	131	3,34	2,42	-2	8	10
	Zuwachs Faktenwissen (Item 1-7)	131	2,76	1,58	-1	7	8
	Zuwachs Verständnis (Item 8-13)	131	0,59	1,57	-4	4	8

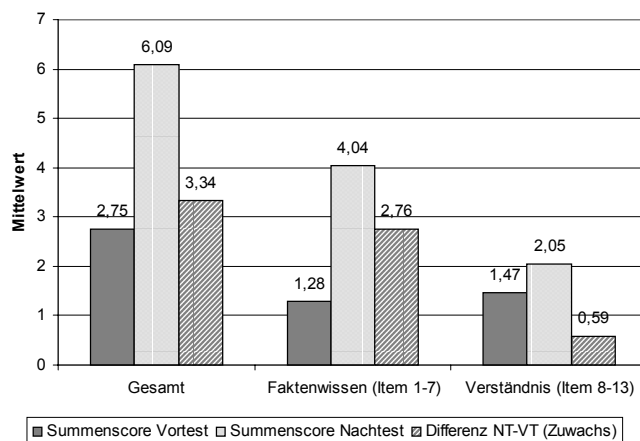


Abbildung VI-14: Mittelwerte für den Vor- und Nachtest sowie ihre Differenz (Zuwachs) in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis

4.1.4 Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest

Zwischen den Vor- und Nachtestergebnissen besteht nur in der Kategorie Faktenwissen ein paarweiser Zusammenhang. Die Korrelation ist als gering einzustufen, erreicht aber das Signifikanzniveau ($r(\text{Faktenwissen VT/NT})=0,249$; $p<0,01$). Keine paarweisen Zusammenhänge bestehen dagegen zwischen der Gesamtpunktzahl und der Verständnisleistung im Vor- und Nachtest. Die Korrelationen deuten damit an, dass gute Vortestergebnisse im Faktenwissen die Nachtestergebnisse dieser Kategorie günstig beeinflussen.

Tabelle VI-7: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs. Die Kategorien, die trivialerweise hochsignifikant miteinander korrelieren, sind abgeblendet dargestellt.

			Vortest			Nachtest		
			Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-7)	Summe Verständnis (Item 8-13)	Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-7)	Summe Verständnis (Item 8-13)
Vortest	Gesamtpunktzahl	r	1	0,746**	0,820**	0,146	0,091	0,127
	Summe Faktenwissen (Item 1-7)	r	-	1	0,229**	0,234**	0,249**	0,077
	Summe Verständnis (Item 8-13)	r	-	-	1	0,011	-0,081	0,120
Nachtest	Gesamtpunktzahl	r	-	-	-	1	0,799**	0,657**
	Summe Faktenwissen (Item 1-7)	r	-	-	-	-	1	0,072
	Summe Verständnis (Item 8-13)	r	-	-	-	-	-	1

° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$; keine Angabe: p nicht signifikant

4.2 Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen

4.2.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

4.2.1.1 Die Auswirkung der Experimentalgruppen auf Faktenwissen und Verständnis bezüglich der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran

Tabelle VI-8 und Abbildung VI-15 zeigen die Ergebnisse des *Lernzuwachs gesamt*, des *Zuwachs Faktenwissen* und des *Zuwachs Verständnis* und den Vergleich dieser Ergebnisse hinsichtlich der Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“. Wie aus der Abbildung VI-15 ersichtlich, ist die Experimentalgruppe „Animation“ der Experimentalgruppe „Standbild“ im Hinblick auf alle drei abhängigen Variablen überlegen. Die Mittelwerte für die Experimentalgruppe „Standbild“ betragen für den *Zuwachs Faktenwissen* 2,50 und für den *Zuwachs im Verständnis* 0,64. Die Experimentalgruppe „Animation“ erlangte dagegen im Mittel einen Zuwachs beim Faktenwissen von 3,11 und einen Zuwachs beim Verständnis von 1,26.

Die statistische Auswertung mittels t-Test zeigte allerdings, dass die Unterschiede in den Mittelwerten aller drei abhängigen Variablen nicht das Signifikanzniveau erreichen (s. Tabelle VI-8). Die beiden Experimentalgruppen unterscheiden sich im *Lernzuwachs gesamt* lediglich tendenziell ($t(53)=-1,859$, $p<0,1$). Die Überlegenheit der Animationsversion für das Verständnis komplexer biologischer Prozesse, wie sie in der Hypothese 2 (s. III 2) postuliert wurde, konnte auf der Basis der Ergebnisse der Studie 2 (Atmungskette) damit nur in der Tendenz bestätigt werden. Die Ergebnisse lassen zwar eine größere Lernwirksamkeit der Animationsversion sowohl für das Faktenwissen als auch für das Verständnis vermuten, dies kann aber nicht statistisch abgesichert werden.

Tabelle VI-8: Unterschiede in den Leistungen bzgl. *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* für die Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(53)
Lernzuwachs gesamt	Standbild	28	3,14	2,43	-1,859°
	Animation	27	4,37	2,47	
Zuwachs Faktenwissen	Standbild	28	2,50	1,53	-1,305 (n.s.)
	Animation	27	3,11	1,93	
Zuwachs Verständnis	Standbild	28	0,64	1,45	-1,667 (n.s.)
	Animation	27	1,26	1,29	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

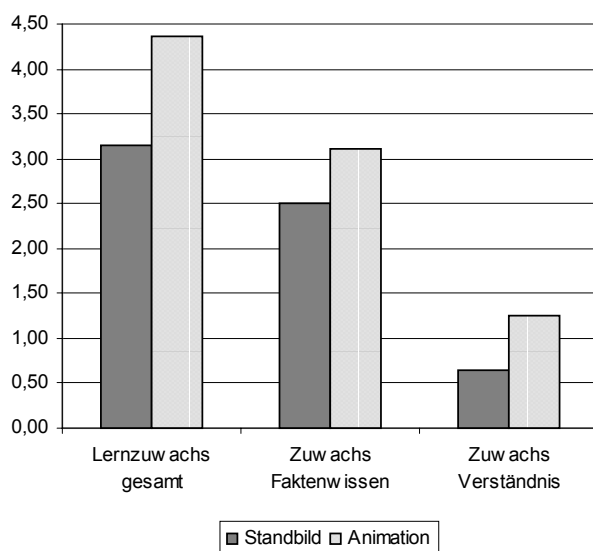


Abbildung VI-15: Mittelwertvergleich der Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ für die drei abhängigen Variablen

4.2.1.2 Der Einfluss des Vorwissens

Definition des Lernermerkmals „Vorwissen“

Das Lernermerkmal „Vorwissen“ zum Thema „Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran“ wird durch das themenspezifische Faktenwissen der Versuchspersonen definiert. Dieses wurde durch die Items 1-7 im Vortest der Studie 2 (s. IX 6.6) überprüft. Das bei den Versuchspersonen bereits vorhandene Verständnis der Vorgänge wird zur Operationalisierung des Vorwissens nicht herangezogen. Diese Definition befindet sich im Einklang mit der in Studie 1 vorgenommenen Operationalisierung des Vorwissens (s. V 4.2.1).

Daher wurde der Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen im Vortest und dem Verständnis in Vor- und Nachtest auch in dieser Studie überprüft. Tabelle VI-9 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Faktenwissen Vortest und dem Verständnis in Vor- und Nachtest, sowie für den Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen im Vortest und dem Zuwachs in der Kategorie Verständnis. Hier erweist sich lediglich der Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen Vortest und dem Verständnis Vortest als hochsignifikante Korrelation von geringer Größe ($r=0,229$, $p<0,01$). Das Faktenwissen Vortest korreliert dagegen nicht mit dem Verständnis im Nachtest ($r=0,077$, p n.s.) und auch nicht mit dem Zuwachs in dieser Kategorie.

Tabelle VI-9: Bivariate Korrelationen zwischen dem Faktenwissen zum Thema die Atmungskette im Vortest und den Verständnisleistungen von Vor- und Nachtest sowie dem Zuwachs in dieser Kategorie

		Verständnis Vortest	Verständnis Nachtest	Zuwachs Verständnis Differenz NT-VT
Faktenwissen Vortest	r	0,229**	0,077 (n.s.)	-0,111 (n.s.)
	N	131	131	131

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

Eine mögliche Erklärung dafür, dass das themenspezifische Vorwissen entgegen der Erwartung nicht mit dem Nachtestergebnis in der Kategorie Verständnis und auch nicht mit dem Zuwachs im Verständnis korreliert, könnten die allgemein geringen Summenscores im Verständnis Nachtest und die daraus resultierenden geringen Lernzuwächse in dieser Kategorie sein. Von daher wird das methodische Vorgehen und die hier angewendeten statistischen Analysen an anderer Stelle noch einmal aufgegriffen und diskutiert (s. Abschnitt 5 in diesem Kapitel).

Zur Operationalisierung der unabhängigen Variable „Vorwissen“ werden zwei Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau (gering vs. hoch) durch eine Clusteranalyse auf der Basis ihres bereits vorhandenen themenspezifischen Faktenwissens eingeteilt, so dass sie sich hinsichtlich ihres Vorwissens signifikant unterscheiden.

Clusteranalyse zur Einteilung der Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau

Zur Untersuchung der Interaktion zwischen den Faktoren „Experimentalgruppe“ und „Vorwissen“ im Sinne der Hypothese 3 (s. III 2) wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, die zwei Gruppen mit signifikant unterschiedlichem Vorwissen lieferte. Die Stichprobe wurde auf der Basis ihres Summenscores des Faktenwissens im Vortest (Items 1-7, s. IX 6) in zwei Gruppen differenziert, wobei die eine über geringes, die andere dagegen über hohes Vorwissen verfügt. Die deskriptiven Statistiken für diese beiden Gruppen sind in Tabelle VI-10 und Tabelle VI-11 aufgeführt.

Tabelle VI-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“

<i>Geringes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-7) Vortest	113	0	2	1,00	0,76

Tabelle VI-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“

<i>Hohes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-7) Vortest	18	3	4	3,06	0,24

Aus den beiden Tabellen wird deutlich, dass die Gruppe mit geringem Vorwissen 86% der Gesamtstichprobe (113 von 131 Versuchspersonen) ausmacht. Diese Personen erreichen Summenscores im Faktenwissen des Vortest im Bereich von 0 bis 2 Punkten. Diejenigen 13% der Stichprobe, die in die Gruppe „hohes Vorwissen“ eingeordnet werden, liegen mit ihren Summenscores in der Kategorie Faktenwissen im Vortest über dem Wert 2, erzielen aber nur maximal 4 Punkte von insgesamt 7 erreichbaren. Berücksichtigt man weiterhin die Möglichkeit, dass Versuchspersonen durch die Art des Antwortformats die richtige Antwort mit einer Wahrscheinlichkeit von 25% richtig erraten können, muss man auch in dieser Gruppe das Vorhandensein von themenspezifischem Vorwissen anzweifeln. Die durchgeführte Clusteranalyse deutet damit eher darauf hin, dass die Stichprobe hinsichtlich ihres Vorwissens bezüglich der Atmungskette als homogen einzustufen ist. Damit können Aussagen über die Wirksamkeit der Lernumgebungen für Personen mit großem Vorwissen nur sehr eingeschränkt getroffen werden. Dieser Umstand wird in der Ergebnisdiskussion vertiefend behandelt werden.

Ergebnisse der Varianzanalyse

Für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Experimentalgruppe“ (Standbild, Animation) und „Vorwissen“ (gering, hoch) durchgeführt. Die Zuwächse in der abhängigen Variable *Verständnis* fallen nach dem bisher gesagten erwartungsgemäß für alle vier Gruppen gering aus. Personen, die die Animationsversion bearbeitet hatten, erreichten bessere Lernergebnisse als Personen der Experimentalgruppe „Standbild“. Dies gilt auch unabhängig vom Vorwissen. Für Personen mit großem Vorwissen sind die Unterschiede im *Zuwachs Verständnis* zwischen den beiden Experimentalgruppen jedoch geringer ausgeprägt als bei Personen mit geringem Vorwissen. In dieser Studie profitierten damit tatsächlich Personen mit geringem Vorwissen am meisten von der animierten Version der Lernumgebung für ihr Verständnis. Die beschriebenen Effekte erreichen jedoch aufgrund der insgesamt geringen Unterschiede im *Zuwachs Verständnis* nicht das Signifikanzniveau. Damit kann die Richtigkeit der Hypothese 3 (s. III 2) anhand dieses Ergebnisses in der Studie 2 (Atmungskette) nicht bestätigt werden. Die Stichprobengrößen und Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen entnehme man Tabelle VI-12; Abbildung VI-16 stellt die Gruppenmittelwerte zusätzlich grafisch dar.

Tabelle VI-12: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Standbild, Animation) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Standbild	gering	23	0,61	1,31
	hoch	5	0,80	2,17
Animation	gering	25	1,28	1,34
	hoch	2	1,00	0,00

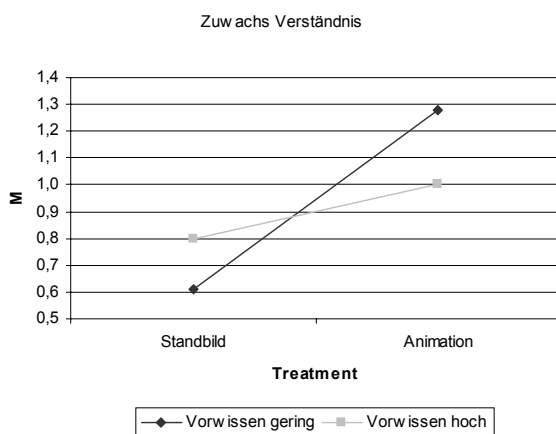


Abbildung VI-16: Gruppenvergleich des Mittelwerts der abhängigen Variable *Zuwachs Verständnis*

4.2.1.3 Der Einfluss der Lernpräferenz

Clusteranalyse zur Einteilung von Verbalisierern und Visualisierern

Um die 131 Versuchspersonen in die beiden Gruppen „Verbalisierer“ und „Visualisierer“ einteilen zu können, die sich signifikant in ihrer Lernpräferenz unterscheiden, wurde auf der Basis der Mittelwerte der Skalen „verbale Lernpräferenz“ und „visuelle Lernpräferenz“ eine Clusteranalyse durchgeführt. Diese ergab eine Einteilung der Gesamtstichprobe in 72 Verbalisierer und 59 Visualisierer. Die beiden resultierenden Cluster unterscheiden sich sowohl maximal in ihrer verbalen als auch in ihrer visuellen Lernpräferenz. Tabelle VI-13 und Tabelle VI-14 fassen die deskriptiven Statistiken für die beiden Cluster zusammen.

Tabelle VI-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“

<i>Verbalisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	72	0,50	3,00	2,15	0,56
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	72	0,00	1,50	0,88	0,40

Tabelle VI-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“

<i>Visualisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	59	0,17	3,00	1,94	0,60
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	59	1,50	3,00	2,14	0,45

Die Zugehörigkeit zu einem der beiden Cluster wird vorwiegend durch die Höhe der visuellen Lernpräferenz bestimmt (s. Tabelle VI-13 und Tabelle VI-14). Im Streudiagramm (Abbildung VI-17) wird deutlich, dass im Cluster der Visualisierer auch Personen mit starker verbaler Kompetenz neben ihrer bevorzugten visuellen Lernpräferenz vertreten sind. Die Verbalisierer sind dagegen durchweg schwach mit visuellen Fähigkeiten ausgestattet.

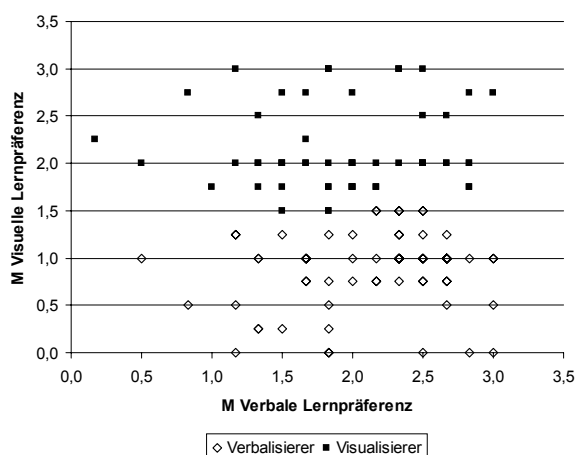


Abbildung VI-17: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“. Auf der Abszisse sind die Mittelwerte der verbalen Lernpräferenz, auf der Ordinate diejenigen für die visuelle Lernpräferenz aufgetragen.

Ergebnisse der Varianzanalysen

Für die drei abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* wurden jeweils zweifaktorielle Varianzanalysen mit den Faktoren „Experimentalgruppe“ (Standbild, Animation) und „Lernpräferenz“ (Verbalisierer, Visualisierer) durchgeführt. Personen der Experimentalgruppe „Animation“ erreichten bessere Lernergebnisse als diejenigen der Experimentalgruppe „Standbild“. Darüber lernen Visualisierer gemeinhin besser als Verbalisierer. Lediglich für den Zuwachs im Faktenwissen deutet sich ein Interaktionseffekt an, der die Hypothese bestätigen könnte, dass allein Visualisierer von der animierten Darstellung profitieren, während die Verbalisierer mit stehenden Bildern ebenso gut lernen wie mit den animierten Darstellungen. Bei diesen Analysen erreichten aber weder die Haupteffekte noch die beschriebenen Interaktionseffekte das Signifikanzniveau. Abbildung VI-18 – Abbildung VI-20 stellen die Ergebnisse bezüglich aller drei abhängigen Variablen grafisch dar; die Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen befinden sich in den zugehörigen Tabellen (Tabelle VI-15 – Tabelle VI-17).

Tabelle VI-15: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für *Lernzuwachs gesamt*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Lernzuwachs gesamt	SD
Standbild	Verbalisierer	13	3,15	2,41
	Visualisierer	15	3,13	2,53
Animation	Verbalisierer	11	3,73	2,28
	Visualisierer	16	4,81	2,56

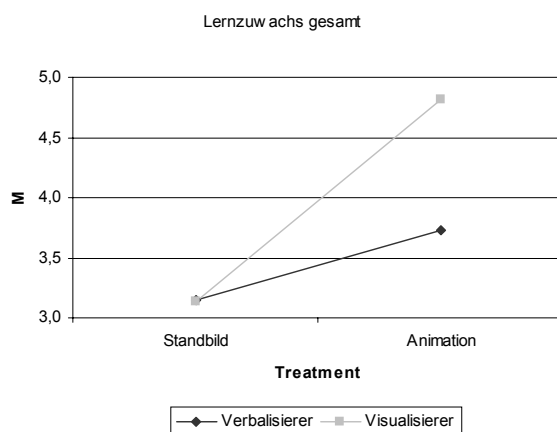


Abbildung VI-18: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Lernzuwachs gesamt*

Tabelle VI-16: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für den *Zuwachs Faktenwissen*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Zuwachs Faktenwissen	SD
Standbild	Verbalisierer	13	2,69	1,65
	Visualisierer	15	2,33	1,45
Animation	Verbalisierer	11	2,64	1,57
	Visualisierer	16	3,44	2,13

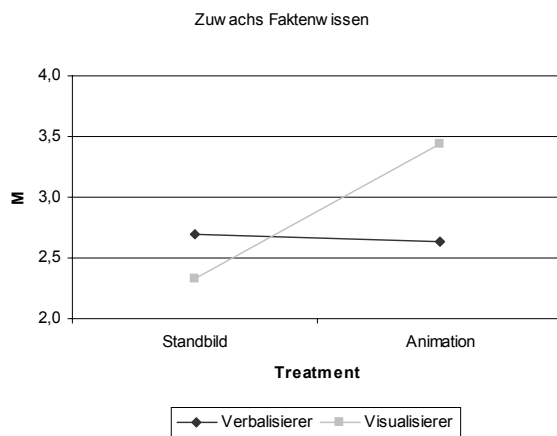


Abbildung VI-19: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Zuwachs Faktenwissen*

Tabelle VI-17: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für *Zuwachs Verständnis*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Standbild	Verbalisierer	13	0,46	1,51
	Visualisierer	15	0,80	1,42
Animation	Verbalisierer	11	1,09	1,51
	Visualisierer	16	1,38	1,15

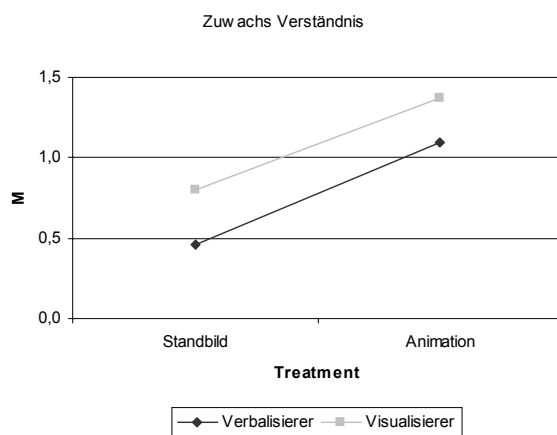


Abbildung VI-20: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Zuwachs Verständnis*

4.2.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Um einen ersten Einblick in die Wirksamkeit von Simulationen auf die Lernzuwächse in den unterschiedlichen Kategorien zu erhalten, wurden die beiden Simulationsgruppen zu einer Gruppe zusammengefasst und mit der Experimentalgruppe „Animation“ verglichen. Hierbei zeigte sich eine deutliche Überlegenheit der Experimentalgruppe „Animation“ gegenüber der zusammengefassten Simulationsgruppe. Die Mittelwertsunterschiede fielen signifikant bezüglich des Lernzuwachses gesamt ($t(101)=2,484$, $p<0,05$) bzw. sehr signifikant bezüglich des Zuwachses Verständnis ($t(101)=2,661$, $p<0,01$) aus. Tabelle VI-18 und Abbildung VI-21 zeigen die Ergebnisse im Einzelnen.

Tabelle VI-18: Zuwächse in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppe „Animation“ und die zusammengefasste Gruppe „beide Simulationen“

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(101)
Lernzuwachs gesamt	Animation	27	4,37	2,47	2,484*
	beide Simulationen	76	3,05	2,33	
Zuwachs Faktenwissen	Animation	27	3,11	1,93	1,082 (n.s)
	beide Simulationen	76	2,72	1,47	
Zuwachs Verständnis	Animation	27	1,26	1,29	2,661**
	beide Simulationen	76	0,33	1,64	

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

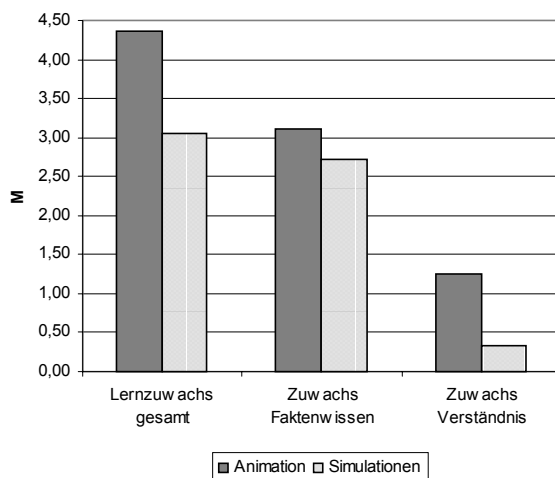


Abbildung VI-21: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ für die drei abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis*

Im Anschluss daran wurde eine dreifach gestufte einfaktorielle Varianzanalyse mit dem Faktor Experimentalgruppe durchgeführt. Hierbei wurde die Experimentalgruppe „Animation“ durch zwei entsprechende a-priori-Kontraste mit den beiden Simulationsgruppen einzeln verglichen. Diese Analyse ergab statistisch signifikante Ergebnisse bezüglich beider Kontraste. Verglichen mit der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ lernten Personen mit der animierten Lernumgebung hinsichtlich des Lernzuwachses gesamt signifikant besser ($t(100)=2,086$, $p<0,05$) und hinsichtlich des Zuwachses im Verständnis sogar hoch signifikant besser ($t(100)=2,358$, $p<0,01$). Im Vergleich zu der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ profitierte die Experimentalgruppe „Animation“ ebenfalls. Hier fielen die Mittelwertsvergleiche hinsichtlich der beiden Variablen *Lernzuwachs gesamt* ($t(100)= 2,321$, $p<0,01$) und *Zuwachs Verständnis* ($t(100)= 2,355$, $p<0,01$) hoch signifikant aus. Tabelle VI-19 und Tabelle VI-20 zeigen die Stichprobengrößen und Mittelwerte mit Standardabweichungen der berichteten Ergebnisse. Abbildung VI-22 stellt die Unterschiede in den Mittelwerten der abhängigen Variablen für die drei Experimentalgruppen vergleichend grafisch dar.

Tabelle VI-19: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“.

Des Weiteren ist der T-Wert des zugehörigen Kontrasttests angegeben.

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(100)
Lernzuwachs gesamt	Animation	27	4,37	2,47	2,086*
	Simulation mit IH 1	39	3,13	2,46	
Zuwachs Faktenwissen	Animation	27	3,11	1,93	0,787 (n.s.)
	Simulation mit IH 1	39	2,79	1,52	
Zuwachs Verständnis	Animation	27	1,26	1,29	2,358**
	Simulation mit IH 1	39	0,33	1,68	

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$; IH: instruktionale Hilfestellungen

Tabelle VI-20: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“.

Des Weiteren ist der T-Wert des zugehörigen Kontrasttests angegeben.

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(100)
Lernzuwachs gesamt	Animation	27	4,37	2,47	2,321**
	Simulation mit IH 2	37	2,97	2,22	
Zuwachs Faktenwissen	Animation	27	3,11	1,93	1,139 (n.s.)
	Simulation mit IH 2	37	2,65	1,42	
Zuwachs Verständnis	Animation	27	1,26	1,29	2,355**
	Simulation mit IH 2	37	0,32	1,63	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01; IH: instruktionale Hilfestellungen

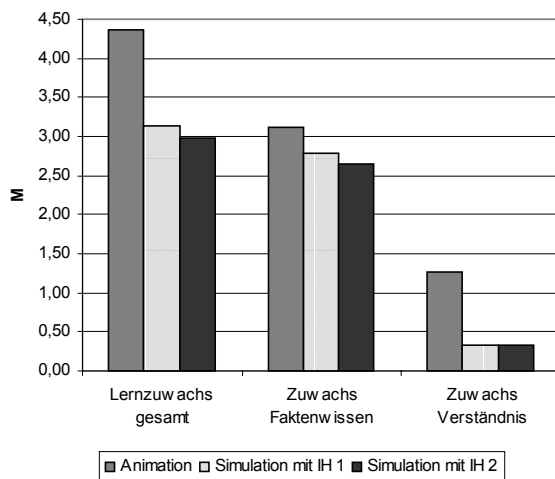


Abbildung VI-22: Mittelwertvergleiche der Experimentalgruppen „Animation“, „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ für die drei abhängigen Variablen

IH: instruktionale Hilfestellungen

4.2.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Um die Wirksamkeit der hier verwendeten instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen zu ermitteln, wurden die Mittelwerte der beiden Simulationsgruppen mittels t-Test verglichen. Die Gruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ ist der anderen Simulationsgruppe bei allen Lernzuwächsen minimal überlegen. Diese Analyse ergab jedoch keine statistisch bedeutsamen Unterschiede hinsichtlich der drei abhängigen Variablen zwischen diesen beiden Experimentalgruppen. Die Ergebnisse werden von Tabelle VI-21 und Abbildung VI-23 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle VI-21: Gruppenvergleich der Mittelwerte in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(74)
Lernzuwachs gesamt	Simulation mit IH 1	39	3,13	2,46	0,288 (n.s.)
	Simulation mit IH 2	37	2,97	2,22	
Zuwachs Faktenwissen	Simulation mit IH 1	39	2,79	1,52	0,432 (n.s.)
	Simulation mit IH 2	37	2,65	1,42	
Zuwachs Verständnis	Simulation mit IH 1	39	0,33	1,68	0,024 (n.s.)
	Simulation mit IH 2	37	0,32	1,63	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01; IH: instruktionale Hilfestellung

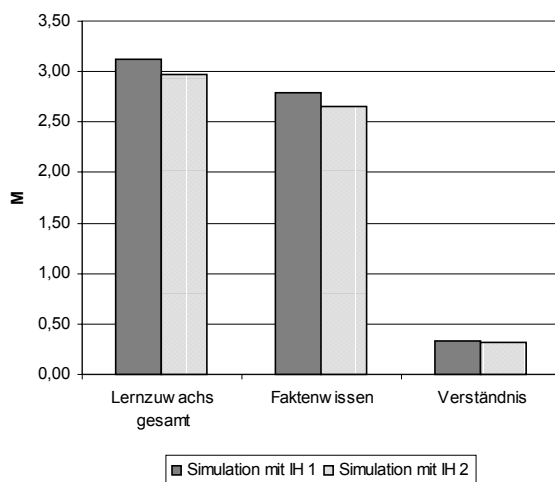


Abbildung VI-23: Mittelwerte der Experimentalgruppen „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ für die drei abhängigen Variablen

IH: instruktionale Hilfestellungen

4.2.3.1 Der Einfluss des Vorwissens

Zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Faktor Experimentalgruppe (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1, Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2) und dem themenspezifischen Vorwissen (gering, hoch) wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Die Einteilung der Stichprobe in die beiden Vorwissensgruppen basiert auf der Clusteranalyse, die bereits unter 4.2.1.2 vorgestellt wurde. Die Anzahl der Personen mit hohem Vorwissen ist deutlich geringer als die Anzahl der Personen mit niedrigem Vorwissen. Ferner sind die Zuwächse im Verständnis bei allen vier Gruppen äußerst gering. Sie fallen sogar bei den beiden Stichproben mit hohem Vorwissen negativ aus. Damit erzielten Personen mit niedrigem Vorwissen unabhängig davon, mit welcher Simulation sie gelernt haben, die besseren Ergebnisse im *Zuwachs Verständnis*. Diese beschriebenen Haupteffekte sind genau wie der Interaktionseffekt zwischen den beiden Faktoren statistisch nicht signifikant.

Tabelle VI-22: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1, Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	gering	35	0,40	1,74
	hoch	4	-0,25	0,96
Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	gering	30	0,43	1,61
	hoch	7	-0,14	1,77

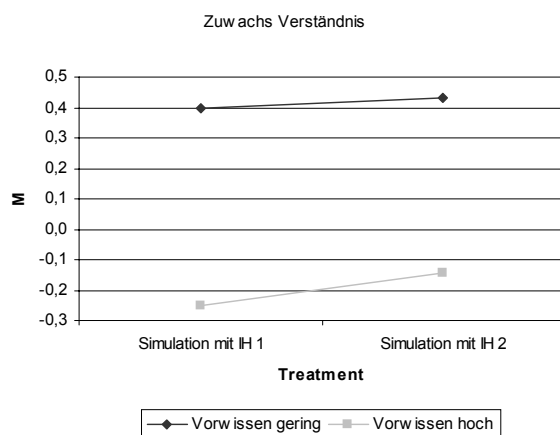


Abbildung VI-24: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis*

IH: instruktionalen Hilfestellungen

4.2.3.2 Kognitive Belastung

Mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wurde der Einfluss der Lernumgebung (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1, Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2) und des Vorwissens (gering, hoch) auf die subjektive wahrgenommene kognitive Belastung als abhängige Variable untersucht. Aus Tabelle VI-23 und Abbildung VI-25 wird deutlich, dass sich Personen mit geringem Vorwissen unabhängig von der Experimentalgruppe deutlich stärker kognitiv belastet gefühlt haben als Personen mit hohem Vorwissen. Dieser Haupteffekt ist mit $F(1,72)= 4,90$, $p<0,05$ signifikant. Der Mittelwertsunterschied der kognitiven Belastung fällt im Hinblick auf die beiden Lernumgebungen dagegen nicht signifikant aus. Hier deutet sich ein Interaktionseffekt an: Personen mit großem Vorwissen fühlen sich durch die weniger instruktional unterstützte Variante der beiden Simulationen (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1) stärker kognitiv belastet, während die zusätzlichen Instruktionen der anderen Simulation (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2) bei Personen mit geringem Vorwissen eine stärkere kognitive Belastung hervorrufen. Dieser Interaktionseffekt ist jedoch ebenfalls nicht signifikant.

Tabelle VI-23: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für *kognitive Belastung* als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung, Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Hilfestellung) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Kognitive Belastung	SD
Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	gering	35	2,20	0,72
	hoch	4	1,78	0,75
Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	gering	30	2,29	0,87
	hoch	7	1,55	0,62

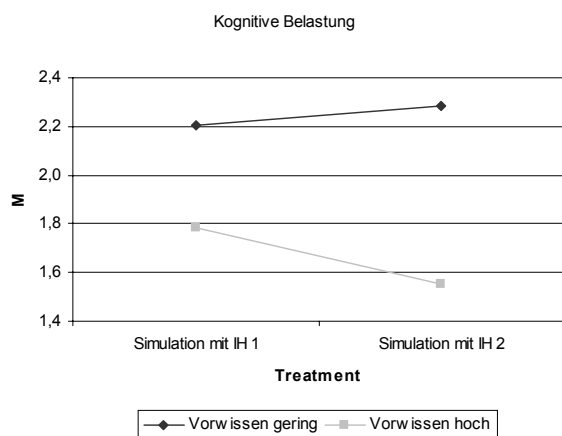


Abbildung VI-25: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Kognitive Belastung*

Die Tabelle VI-24 zeigt jedoch, dass die *kognitive Belastung* nur sehr schwach negativ mit den abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* und *Zuwachs Faktenwissen* korreliert. Der Zusammenhang zwischen der *kognitiven Belastung* und dem *Zuwachs Verständnis* fällt dagegen sehr schwach positiv aus. Entsprechend erreichen diese Analysen nicht das Signifikanzniveau. Damit bleibt die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung auch in dieser Studie ohne gravierenden Einfluss auf die drei Kategorien des Lernerfolgs.

Tabelle VI-24: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der *kognitiven Belastung* und den drei Maßen des Lernerfolgs

		M Kognitive Belastung
Lernzuwachs gesamt	r	-0,071
	N	76
Zuwachs Faktenwissen	r	-0,164
	N	76
Zuwachs Verständnis	r	0,046
	N	76

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

4.3 Analysen mit probabilistischen Testmodellen

Die obige Darstellung der varianzanalytischen Ergebnisse zeigt, dass eine Analyse des Lernerfolgs mithilfe inferenzstatistischer Verfahren problematisch ist. Es wurde anhand der deskriptiven Statistik und der Clusteranalyse zur Einteilung zweier Vorwissensgruppen deutlich, dass die Stichprobe über sehr geringe themenspezifische Vorkenntnisse in Bezug auf die Atmungskette verfügt. Ferner ergaben sich allgemein nur geringe Lernzuwächse in der Kategorie Verständnis. Damit einher gingen minimale Mittelwertsunterschiede zwischen den verschiedenen Experimentalgruppen im Hinblick auf diese abhängige Variable. Daher musste überlegt werden, ob Varianzanalysen, die die quantitativen Unterschiede zwischen zwei Experimentalgruppen in Bezug auf die abhängigen Variablen ermitteln, bei dieser Datenlage überhaupt das adäquate Verfahren waren.

In Ergänzung zu den inferenzstatistischen Methoden wurden die Daten der Studie 2 daher zusätzlich mithilfe probabilistischer Testmodelle analysiert. Auf diese Weise wurde einerseits die Passung quantifizierender Testmodelle überprüft und damit im Nachhinein auch, ob die Anwendung inferenzstatistischer Verfahren auf die Daten angemessen gewesen war (vgl. hierzu Rost, 1996). Andererseits wurde mithilfe klassifizierender Testmodelle ermittelt, ob in der gesamten Stichprobe *qualitative Personenunterschiede im Hinblick auf themenspezifisches Vorwissen und den Lernerfolg* über das Profil der Itemantworten zu identifizieren sind (s. IV 4.2). Im Anschluss daran wurden auf der Basis des ausgewählten klassifizierenden Testmodells wiederum Vergleiche zwischen den Experimentalgruppen durchgeführt, die eine Beurteilung der Wirksamkeit der verschiedenen Lernumgebungen unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens ermöglichen. Die klassifizierende Testauswertung liefert aber nur für diejenigen Forschungshypothesen eine Ausdifferenzierung der Ergebnisse, in denen die Wirksamkeit eines bestimmten Treatments unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens postuliert wird. Der Einfluss der Lernpräferenz und der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg wurden mithilfe dieses Verfahrens nicht näher untersucht.

In den beiden folgenden Abschnitten werden nun also die Ergebnisse vorgestellt, die auf der Datenanalyse mit probabilistischen Testmodellen basieren (s. IV 4.2). Zunächst soll mit einigen Vorbemerkungen die Verwendung probabilistischer Testmodelle erläutert werden (s. 4.3.1). Im Anschluss daran wird ein adäquates Testmodell für den Datensatz anhand von Modellgeltungsindices und Zuordnungswahrscheinlichkeiten ausgewählt (s. 4.3.2, 4.3.3 und 4.3.4). Nachfolgend werden die zugehörigen Itemprofile der ausgewählten Lösung vorgestellt

(s. 4.3.5). Hieran schließt sich eine detaillierte Analyse des Lernerfolgs für die Gesamtstichprobe auf der Basis dieser Itemprofile an (s. 4.3.6).

4.3.1 Vorbemerkungen zur probabilistischen Testauswertung

Für den Wissenstest zum Thema „Die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran“ wurden sowohl quantifizierende als auch klassifizierende Testmodelle auf ihre Gültigkeit überprüft. Als quantifizierendes Modell wurde das eindimensionale Raschmodell berechnet und überprüft, ob sich die Daten durch dieses Modell angemessen abbilden ließen. Seine Passung würde im Nachhinein die Verwendung von Summenscores bzw. ihrer Differenzen bei den klassischen Testverfahren legitimieren bzw. in Frage stellen (Rost, 1996). Bei der Berechnung der klassifizierenden Testmodelle musste die Klassenanzahl vorher festgelegt werden, da die Klassenanzahl keinen Modellparameter darstellt, der bei der Modellierung geschätzt wird (s. IV 4.2.2). Der zu modellierende Wissenstest, der das themenspezifische Wissen zur Atmungskette überprüfte, war so konzipiert, dass sich die Items in Fragen zur Überprüfung des Faktenwissens und zur Überprüfung des Verständnisses einteilen ließen. Auf dieser Basis erscheinen klassifizierende Testmodelle mit zwei bis vier latenten Klassen plausibel. Während ein Modell mit zwei latenten Klassen beispielsweise nur „Köner“ mit hohem themenspezifischen Wissen von den „Nicht-Köner“ unterscheiden würde, könnte ein Modell mit drei latenten Klassen so strukturiert sein, dass sich in der Klasse 1 Personen befinden, die über keinerlei domänenspezifisches Wissen verfügen; in der Klasse 2 könnten Personen zusammengefasst sein, die ausschließlich über Faktenwissen verfügen; in der dritten Klasse könnten sich schließlich Personen befinden, die sowohl Faktenwissen beherrschen als auch Transferaufgaben lösen können. Bei einem 4-Klassen-Modell wäre darüber hinaus eine Klasse denkbar, in der die Personen vorwiegend Transferleistungen erbringen oder eine andere spezielle Itemkombination überdurchschnittlich beantworten.

Basierend auf diesen Vorüberlegungen wurden neben dem quantifizierenden eindimensionalen Raschmodell durch latente Klassenanalysen Modelle mit zwei bis vier latenten Klassen auf ihre Gültigkeit überprüft. Die Ergebnisse der Modellgeltung zeigt der nächste Abschnitt.

4.3.2 Modellgeltung

Zur Erklärung der Daten in Studie 2 wurden vier probabilistische Testmodelle, ein quantifizierendes und drei klassifizierende, auf ihre Geltung überprüft. Tabelle VI-25 zeigt die zugehörigen Modellgeltungsindices für die getesteten Modelle.

Tabelle VI-25: Geltung ausgewählter probabilistischer Testmodelle

Modell	BIC-Index	CAIC-Index
Eindimensionales Raschmodell (Rasch1)	4222,70	4236,70
Klassifizierendes Modell mit zwei latenten Klassen (LCA2)	4137,68	4164,68
Klassifizierendes Modell mit drei latenten Klassen (LCA3)	4166,56	4207,56
Klassifizierendes Modell mit vier latenten Klassen (LCA4)	4213,50	4268,50

4.3.3 Auswahl eines Testmodells

Anhand der Modellgeltungsindices wird deutlich, dass das quantifizierende Rasch-Modell die Daten nur wenig adäquat abbildet; sein BIC-Index ist von allen getesteten Modellen am größten und auch nach dem CAIC-Index ist das Rasch-Modell nur die drittbeste Wahl (s. Tabelle VI-25). Damit erscheint eine zusätzliche qualitative Auswertung der Studie 2 ergänzend zu den quantitativen varianzanalytischen Testverfahren angemessener. Nach den Modellgeltungsindices zu urteilen, wäre die 2-Klassen-Lösung hinreichend, die Daten der Studie 2 mit einem klassifizierenden Testmodell zu erklären. Die 2-Klassen-Lösung liefert jedoch Itemprofile, die sich in erster Linie in quantitativer Hinsicht unterscheiden, d. h. die Höhe der Lösungswahrscheinlichkeiten für alle Testitems ist für die eine Klasse stets größer als für die andere Klasse. Für die weiteren Analysen wurde deshalb die nach dem BIC- und CAIC-Wert zweitbeste Lösung, das Testmodell mit drei latenten Klassen, ausgewählt. Das 3-Klassen-Modell liefert wesentlich stärker differenzierte Itemprofile der drei latenten Klassen (s. 4.3.5), und ist damit im Hinblick auf das Vorwissen und den Lernerfolg besser interpretierbar als die 2-Klassen-Lösung.

4.3.4 Zuordnungswahrscheinlichkeiten beim klassifizierenden Modell mit drei latenten Klassen (LCA3)

Um die Zuverlässigkeit des ausgewählten Testmodells LCA3 zusätzlich abzusichern, zumal es sich nach den Modellgeltungsindices nicht als die beste Lösung erwiesen hat, wurden als weitere Kriterien die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den latenten Klassen herangezogen (s. IV 4.2.4). Bei drei Klassen beträgt die durchschnittliche minimale Wahrscheinlichkeit, einer der drei Klassen zugeordnet zu werden, 33,3% – in diesem Fall wäre das Antwortmuster der Person keiner der drei Klassen eindeutig zuzuordnen. In dem ausgewählten Testmodell beträgt die minimale Wahrscheinlichkeit, mit der eine Versuchsperson ihrer Klasse zugeordnet wird, 48,8%. Damit wird eine Zuordnungswahrscheinlichkeit <50% von lediglich 0,4% der Stichprobe dieser Studie erreicht. 72,9% der Versuchspersonen wurden ihren Klassen dagegen mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 90\%$ zugeordnet, 43,5% mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 99\%$. Die Mittelwerte der Zuordnungswahrscheinlichkeiten, mit der die Versuchspersonen einer Klasse jeder der drei Klassen angehören, werden in Tabelle VI-26 gezeigt. Hiermit wird überprüft, dass es keine ungünstigen Häufungen von geringen Zuordnungswahrscheinlichkeiten in einer bestimmten Klasse gibt. Dies könnte die Legitimation der Klasse und damit auch die Zuverlässigkeit der ausgewählten Typologie in Frage stellen. Der Mittelwert der maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeit einer Klasse beträgt in allen drei Fällen mindestens 88,0%. Die alternativen zugehörigen zweit- und dritthöchsten Zuordnungswahrscheinlichkeiten überschreiten dagegen für keine Klasse den Wert 11,6%. Auf dieser Basis kann die 3-Klassen-Lösung als zuverlässig eingestuft werden.

Tabelle VI-26: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten [Standardabweichung] für die drei latenten Klassen des Modells

Klasse	Erwartete Größe		Zuordnungs- wahrscheinlichkeit	Zuordnungs- wahrscheinlichkeit	Zuordnungs- wahrscheinlichkeit
	N	N [%]	Klasse 1 [SD]	Klasse 2 [SD]	Klasse 3 [SD]
1	140	53,4	94,9% [10,3%]	4,3% [9,4%]	0,8% [3,5%]
2	89	34,0	4,2% [9,5%]	88,5% [14,2%]	7,3% [12,0%]
3	33	12,6	0,5% [1,2%]	11,6% [12,1%]	88,0% [12,5%]
Gesamt	262 ¹³	100			

4.3.5 Itemprofile der latenten Klassen der LCA3

Als probabilistisches Modell zur Erklärung der Daten in Studie 2 wurde ein klassifizierendes Testmodell mit drei latenten Klassen ausgewählt. Im Folgenden werden die Itemprofile der resultierenden latenten Klassen grafisch dargestellt und näher erläutert.

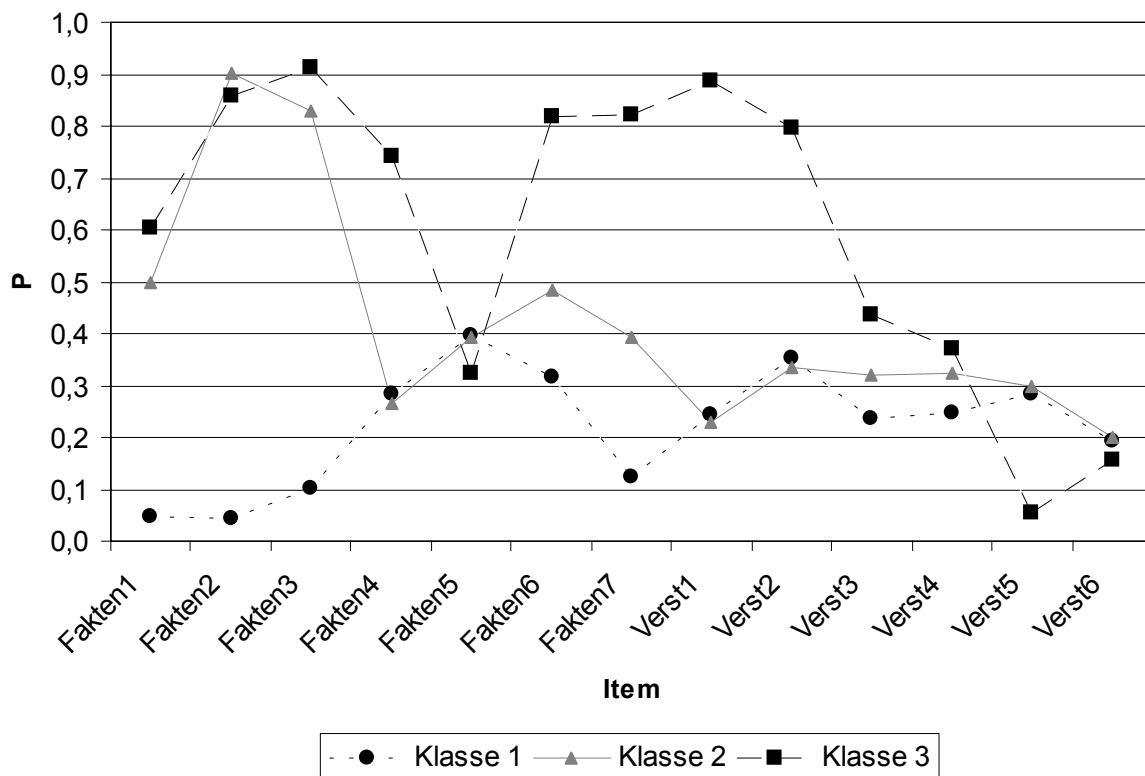


Abbildung VI-26: Itemprofile der drei latenten Klassen des klassifizierenden Testmodells für den gemeinsamen Datensatz bestehend aus Vor- und Nachtest.

In der Klasse 1 werden 52% der Versuchspersonen¹⁴ zusammengefasst. Diese Klasse ist damit die personenreichste des ausgewählten Testmodells. Das Itemprofil der Klasse 1 zeigt Lösungswahrscheinlichkeiten, die für fast alle Items nahe der Zufallswahrscheinlichkeit liegen. Die Zufallswahrscheinlichkeit beträgt in dieser Studie bedingt durch die Testkonstruktion mit einer richtigen von vier möglichen Antworten 25%. Lediglich das Item *Fakten5* wird von der ersten latenten Klasse mit einer Wahrscheinlichkeit von 40% richtig beantwortet. Damit verfügen die Versuchspersonen dieser Gruppe kaum über nennenswertes Faktenwissen. Darüber hinaus findet man bei ihnen auch kein tieferes Verständnis für die Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran. Die Wahrscheinlichkeit, dass Personen dieser Klasse ein Item richtig beantworten, das Faktenwissen testet, beträgt durchschnittlich 18,7%. Die mittlere Wahrscheinlichkeit für die Items, die das tiefere Verständnis überprüfen, erreicht 26,0%. Im Folgenden wird diese Gruppe als Klasse der *Nicht-Köner* bezeichnet.

Die Klasse 2 umfasst 33,8% der Versuchspersonen des modellierten Datensatzes. In dieser Klasse werden Versuchspersonen zusammengefasst, die spezifische Items mit größerer Wahrscheinlichkeit richtig beantworteten. Die Items *Fakten1* sowie *Fakten5* bis *Fakten7* werden mit einer mittelgroßen Wahrscheinlichkeiten zwischen 40% und 50% richtig beantwortet. Die Items *Fakten2* und *Fakten3* werden sogar mit sehr großer Wahrscheinlichkeiten zwischen 80% und 90% richtig beantwortet. Der Mittelwert für die richtige Beantwortung der Faktenwissenitems beträgt in dieser Gruppe 53,7%. Die mittlere Lösungswahrscheinlichkeit für alle Verständnisitems liegt dagegen mit 28,5% knapp über der Wahrscheinlichkeit, diese Items zufällig richtig zu beantworten. Damit unterscheidet sich diese Klasse hinsichtlich der Lösungswahrscheinlichkeit der Verständnisitems Verst1 bis Verst6 nicht wesentlich von der Klasse der Nicht-Köner.

Anhand der Items *Fakten1-Fakten3*, *Fakten5-Fakten7* kann das themenspezifische Wissen der Versuchspersonen in Klasse 2 näher bestimmt werden (s. IX 6.6). Den Versuchspersonen der Klasse 2 ist die Reaktionsgleichung der Atmungskette und ihre Stöchiometrie im Sinne der Knallgasreaktion bekannt. Darüber hinaus wissen diese Personen, dass der Ausgangsstoff Wasserstoff bei dieser Reaktion an das Coenzym NAD^+ gebunden vorliegt. Daran wird deutlich, dass sie mit der Funktionsweise des $\text{NAD}^+/\text{NADH}+\text{H}^+$ -Systems als Elektronenakzeptor bzw. –donator vertraut sind. Des Weiteren beherrschen die Versuchspersonen die Funktionsweise der Proteinkomplexe der Atmungskette in groben Zügen. Sie haben die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport an den Komplexen der inneren Mitochondrienmembran als Vorgang erfasst. Bei den Faktenwissenitems *Fakten6* und *Fakten7* handelt es sich zwar um zwei Aufgaben, die bereits vorhandenes Faktenwissen über die Atmungskette auf ebendiesen Kontext anwenden. Jedoch werden die Versuchspersonen mit diesen Items lediglich aufgefordert, ihr Faktenwissen über die Atmungskette, das sie im Unterricht des 11. Jahrgangs bzw. durch die computergestützte Lernsitzung erworben haben, zu reorganisieren. Tieferes Verständnis wird anhand dieser beiden Items jedoch nicht geprüft. Damit bleibt ihnen z. B. die Bedeutung des Protonentransports an den Komplexen der inneren Mitochondrienmembran im Hinblick auf die ATP-Synthese vollständig verborgen. Ein tieferes Verständnis der Kopplung von Elektronen- und Protonentransport mit dem Aufbau des Protonengradienten als notwendige Voraussetzung für die Synthese von ATP erlangt diese Klasse damit nicht. Sie verfügt also im Wesentlichen über das beschriebene definierte Faktenwissen und soll daher im Folgenden auch plakativ *Fakten* genannt werden.

Die Klasse 3, im Folgenden als *Könner* bezeichnet, unterscheidet sich in ihrem Profil sehr deutlich von den Klassen 1 und 2. Von der gesamten Stichprobe sind 14,2% der Versuchspersonen in diese Klasse einzuordnen. Die Könner-Klasse beantwortet die Faktenwissenitems *Fakten1* bis *Fakten4* mit großen Lösungswahrscheinlichkeiten; diese sind die größer als 60% und damit als sicher einzustufen. Der Mittelwert für die richtige Beantwortung der Faktenwissenitems beträgt in dieser Gruppe 72,6%. Beim Verständnis werden die Items *Verst1* bis *Verst4* mit deutlich größeren Wahrscheinlichkeiten richtig beantwortet als in den beiden anderen Klassen. Der Mittelwert für die Lösungswahrscheinlichkeiten aller Verständnisitems beträgt in der Könner-Klasse 45,1%. Damit verfügt diese Klasse neben dem Faktenwissen über die Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran auch über ein tieferes Verständnis für den Zusammenhang von Elektronentransport, Protonentransport und ATP-Synthese. Insbesondere ist den Versuchspersonen der Könner-Klasse die Bedeutung des Protonengradienten als verbindendes Element zwischen Elektronentransport an den Komplexen der inneren Mitochondrienmembran und der ATP-Synthese geläufig.

Anhand der Itemprofile wird aber auch deutlich, dass manche Items nur eine sehr geringe Trennschärfe für die drei beschriebenen latenten Klassen aufweisen. Dies gilt insbesondere für das Faktenwissenitem *Fakten5* und die Verständnisitems *Verst5* und *Verst6*. Diese Items werden ferner von allen drei Klassen nur knapp oberhalb der Zufallswahrscheinlichkeit richtig beantwortet. Das Item *Verst6* liegt mit seiner Wahrscheinlichkeit sogar noch unterhalb der 25%-Grenze. Diese Verständnisitems waren damit eindeutig für die Stichprobe zu schwer.

4.3.6 Analyse des Lernerfolgs der Gesamtstichprobe

Bei der latenten Klassenanalyse werden Veränderungen bezüglich des Wissensstandes durch einen Klassenwechsel vom Vor- zum Nachtest dokumentiert (s. IV 4.2.5). Diese Wanderungen werden in einer Kreuztabelle protokolliert (s. Tabelle VI-27). In den Zellen sind die Personenhäufigkeiten angegeben. „Lernen“ ist bei der latenten Klassenanalyse durch einen Klassenwechsel vom Vor- zum Nachtest so definiert, dass die Personen von einer Klasse, in der die Antwortwahrscheinlichkeiten geringe Werte annehmen (von einer „niedrigeren“ Klasse), in eine Klasse mit insgesamt höheren Antwortwahrscheinlichkeiten (in eine „höhere“ Klasse) wechseln.

Tabelle VI-27: Kreuztabellierung des Klassenwechsels nach gemeinsamer Modellierung von Vor- und Nachtest. Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

		Nachtest			Gesamt
		Nicht-Könner	Fakten	Könner	
Vortest	Nicht-Könner	14	81	31	126
	Fakten	0	3	2	5
	Gesamt	14	84	33	131

Die Versuchspersonen in den grauunterlegten Zellen der Hauptdiagonalen wechseln ihre Klasse zwischen den beiden Messzeitpunkten nicht. Auch nach der computergestützten Lernsitzung bleiben sie in derjenigen Klasse, der sie auch nach ihrem Vortestergebnis angehört haben. Da die Personen ihre Klassenzugehörigkeit beibehalten, werden sie als „Stagnierende“ bezeichnet. Legt man die obige Definition des Lernerfolgs, „Lernen = Klassenwechsel“, zugrunde, so zeigen die Stagnierenden keinen Lernerfolg. Dennoch kann auch bei ihnen „Lernen“ anhand der Veränderung der Mittelwerte der Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den Klassen nachgewiesen werden. Diese verändern sich spezifisch bei diesen beiden Gruppen (s. Tabelle VI-28 und Tabelle VI-29), und zwar im Allgemeinen so, dass die Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit zu „niedrigeren“ Klassen sinken, während die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu „höheren“ Klassen steigen. Dies wird im Folgenden für die beiden Gruppen gezeigt.

Bei den Stagnierenden, die sowohl nach ihrem Vortest- als auch gemäß ihrem Nachtestergebnis der Nicht-Könner-Klasse angehören, beträgt die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit zu den Nicht-Könnern nach dem Vortestergebnis 97,0%. Zum zweiten Messzeitpunkt nach der computergestützten Lernsitzung im Nachtest produzierten diese Versuchspersonen insgesamt bessere Ergebnisse, so dass die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit zur Klasse „Nicht-Könner“ auf 81,1% sank. Dagegen erhöhten sich aber die Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit zur Klasse „Fakten“ bzw. zur Klasse „Könner“ von 3,0% auf 15,4% bzw. von 0,0% auf 3,6%. Die Zuordnungswahrscheinlichkeiten der Stagnierenden in der Klasse „Fakten“ veränderten sich vergleichbar. In diesem Fall stieg die Zuordnungswahrscheinlichkeit für die Fakten-Klasse von 79,8% auf 80,8% und darüber hinaus für die Könner-Klasse von 1,3% zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) auf 19,1% zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest). Gleichzeitig sank die Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die

Nicht-Köner-Klasse von 18,9% auf 0,0%. Der Lernerfolg der Stagnierenden kann also anhand der veränderten Zuordnungswahrscheinlichkeiten verdeutlicht werden.

Dennoch kann für die drei Stagnierenden in der Klasse „Fakten“ an der Zuordnungswahrscheinlichkeit zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) eine Tendenz zur Nicht-Köner Klasse abgelesen werden. Dies stellt das Vorhandensein von themenspezifischem Vorwissen zum Zeitpunkt T1 in dieser Personengruppe in Frage. Dieser Aspekt soll bei den Lernern ebenfalls berücksichtigt werden.

Tabelle VI-28: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die beiden Gruppen von Stagnierenden

		Messzeitpunkt T1 (Vortest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner / Nicht-Köner (Stagnierende)	14	97,0%	3,0%	0,0%
Fakten / Fakten (Stagnierende)	3	18,9%	79,8%	1,3%

Tabelle VI-29: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachttest) für die beiden Gruppen von Stagnierenden

		Messzeitpunkt T2 (Nachttest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner / Nicht-Köner (Stagnierende)	14	81,1%	15,4%	3,6%
Fakten / Fakten (Stagnierende)	3	0,0%	80,8%	19,1%

Personen, die die Zellen unterhalb der Hauptdiagonalen in Tabelle VI-27 besetzen, vollziehen einen Klassenwechsel von einer „höheren“ in eine „niedrigere“ Klasse. Dieser Wechsel entspräche nach der obigen Definition einem „Verlernen“. Diese Zellen bleiben in den Tabellen unbesetzt. Damit gibt es in der Stichprobe dieser Studie kein Verlernen.

Bei Personen, die in eine „höhere“ Klasse wechseln, hat sich das Antwortprofil vom Vor- zum Nachttest so verändert, dass in diesem Fall offensichtlich von einem Lernerfolg gesprochen werden kann (s. Abbildung VI-26). In Tabelle VI-27 befinden sich die dazugehörigen Zellen oberhalb der grau markierten Hauptdiagonalen. Gemäß diesen Definitionen des Lernerfolgs lernen in der Studie 2 87% der Gesamtstichprobe (114 von 131 Personen). 13% können ihre Kenntnisse bezüglich des Faktenwissens und des Verständnisses über die Atmungskette dagegen nicht verbessern (Summe der Zellen auf der Hauptdiagonalen, 17 von 131 Versuchspersonen). Im Folgenden soll der Lernerfolg unter qualitativen Gesichtspunkten weiter differenziert werden. Damit geben die Betrachtungen darüber Auskunft, was die

Versuchspersonen lernen, wenn sie ihre Klasse wechseln. Grundlage für diese Analyse bilden die Itemprofile der drei verschiedenen Klassen.

- 1. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Nicht-Köner“ in die Klasse „Fakten“ wechseln
Personen, die aufgrund ihres Vortestergebnisses der Klasse „Nicht-Köner“ zugeordnet werden, geben nach ihrem Profil nur mit sehr geringen Wahrscheinlichkeiten richtige Antworten zu allen Items. Damit verfügen sie über keinerlei themenspezifisches Vorwissen. Bei einem Wechsel in die Klasse „Fakten“ erhöht sich die Lösungswahrscheinlichkeit für die Beantwortung spezifischer Items gemäß dem Profil der Klasse „Fakten“. Der Lernerfolg der Versuchspersonen, die von der Klasse „Nicht-Köner“ in die Klasse „Fakten“ wechseln, besteht damit im Erwerb von Wissen über die Oxidation von NAD^+ -gebundenem Wasserstoff auf der Ebene der Reaktionsgleichung und ihrer Stöchiometrie. Des Weiteren beherrschen die Versuchspersonen nach dem Treatment die Funktionsweise der Proteinkomplexe der Atmungskette in groben Zügen. Dabei wird die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport an den Proteinkomplexen als Faktum erfasst, jedoch nicht die tiefere Bedeutung im Hinblick auf die ATP-Synthese. Damit wird im Wesentlichen Faktenwissen über den Elektronentransport an der inneren Mitochondrienmembran erlernt. Gemessen an den Personen, die nach ihrem Vortestergebnis über kein themenspezifisches Vorwissen verfügen (Nicht-Köner nach Vortestergebnis, $N=126$) erwerben 64,3% der Versuchspersonen dieses spezielle Faktenwissen.

- 2. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Nicht-Köner“ in die Klasse „Köner“ wechseln
Personen, die aus der Nicht-Köner-Klasse stammen, verfügen über keinerlei themenspezifisches Vorwissen. Wechseln diese nach der Lernsitzung in die Köner-Klasse, erwerben sie neben dem Faktenwissen, das für die Klasse „Fakten“ kennzeichnend ist und sich hauptsächlich auf den Elektronentransport an der inneren Mitochondrienmembran bezieht, zusätzlich tieferes Verständnis für den Zusammenhang und die Kausalbezüge zwischen dem Elektronentransport mit Protonentransport an den Komplexen und mit der ATP-Synthese der inneren Mitochondrienmembran. Dabei wurde von ihnen ebenfalls die Bedeutung des Protonengradienten als verbindendes Element zwischen dem Elektronen- und Protonentransport an den Komplexen und der ATP-Synthese eingesehen.

Man beachte dabei, dass die Klasse „Köner“ erst im Nachtest zu den beiden Klassen „Nicht-Köner“ und „Fakten“ hinzukommt. Personen, die in diese Klasse wechseln, erwerben den qualitativ größten Lernerfolg. 24,6% der Personen ohne Vorwissen ($N=126$) erreichen nach dem Treatment ein tieferes Verständnis für die Vorgänge der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran.

- 3. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Fakten“ in die Klasse „Könner“ wechseln
Personen, die von der Klasse „Fakten“ in die Klasse „Könner“ wechseln, verfügen gemäß ihres Vortestergebnisses bereits über themenspezifisches Vorwissen, das auf der Kenntnis des Elektronentransports der Atmungskette mit seiner Stöchiometrie beruht. Ausgehend von dieser Basis werden von diesen Versuchspersonen die Kausalzusammenhänge zwischen Elektronentransport und ATP-Synthese mit dem Protonengradienten als Verbindungsglied zwischen diesen Vorgängen verstanden. Diese Verständnisleistungen werden von 2 der 5 Personen mit Vorwissen nach der computergestützten Lernsitzung im Nachtest erzielt. Man beachte hierbei die geringe Stichprobengröße der Personengruppe, die über themenspezifisches Vorwissen verfügt (N=5).

Darüber hinaus verfügt diese Personengruppe auch nicht wirklich über themenspezifisches Vorwissen. Dies wird unmittelbar einsichtig, wenn die Zuordnungswahrscheinlichkeiten für diese Gruppe zum Zeitpunkt T1 betrachtet werden (s. Tabelle VI-30). Die Eingruppierung in die Klasse „Fakten“ nach dem Vortestergebnis kann nämlich keinesfalls als gesichert angesehen werden. Die beiden Versuchspersonen gehören mit einer beinahe ebenso großen Wahrscheinlichkeit der Nicht-Könner-Klasse an. Damit darf man bei den insgesamt 5 Personen, die nach ihrem Vortestergebnis der Klasse „Fakten“ angehören, davon ausgehen, dass auch bei ihnen kaum themenspezifisches Vorwissen vorhanden ist. Damit ist die Stichprobe hinsichtlich ihres themenspezifischen Vorwissens bezüglich der Atmungskette weitestgehend homogen.

Tabelle VI-30: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von Lernern

Klassenwechsel T1 / T2	N	Messzeitpunkt T1 (Vortest)		
		Nicht-Könner	Fakten	Könner
Nicht-Könner / Fakten (Lerner)	81	96,5%	3,0%	0,5%
Nicht-Könner / Könner (Lerner)	31	96,2%	3,4%	0,4%
Fakten / Könner (Lerner)	2	44,0%	54,9%	1,1%

Tabelle VI-31: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von Lernern

Klassenwechsel T1 / T2	N	Messzeitpunkt T2 (Nachtest)		
		Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner / Fakten (Lerner)	81	2,9%	89,9%	7,3%
Nicht-Köner / Köner (Lerner)	31	0,5%	11,8%	87,8%
Fakten / Köner (Lerner)	2	0,2%	8,8%	91,0%

Abbildung VI-27 fasst die Ergebnisse zusammen und stellt sie schematisch dar. Dabei wird die gesamte Stichprobe einmal nach dem Lernerfolg (Pfade von oben kommend) sowie nach dem Vorwissen aufgeteilt (Pfade von unten kommend). Die fettgedruckte Mitte der Abbildung VI-27 repräsentiert damit die Beziehung zwischen Vorwissen und Lernerfolg.

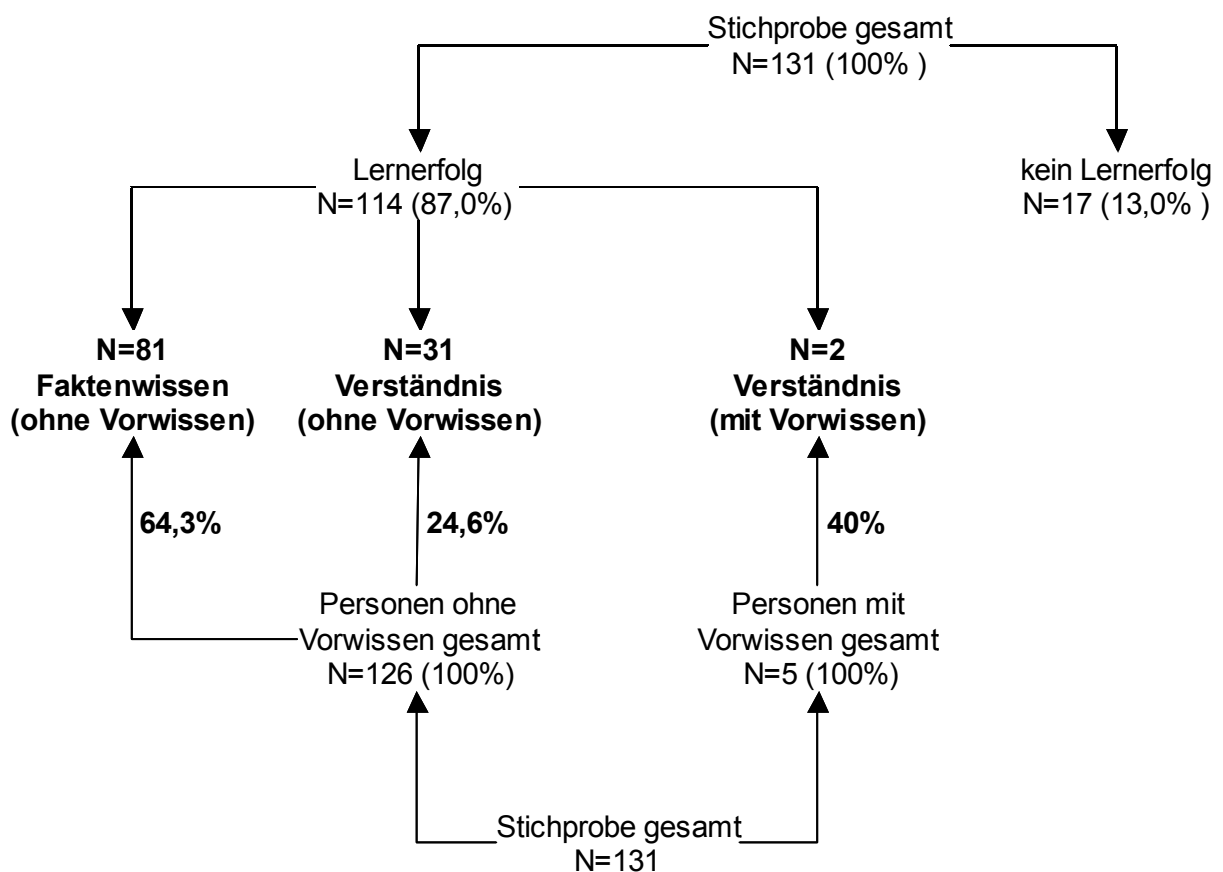


Abbildung VI-27: schematische Übersicht Lernerfolg unter Berücksichtigung des Vorwissens

4.4 Klassifizierende Testmodelle zur Überprüfung der Forschungshypothesen

In diesem Unterabschnitt wird das themenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen und ihr Lernerfolg im Hinblick auf die einzelnen Experimentalgruppen analysiert und zur Überprüfung der Forschungshypothesen vergleichend gegenübergestellt. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass nur bei denjenigen Forschungshypothesen eine Ausdifferenzierung der Ergebnisse möglich ist, in denen die Wirksamkeit eines bestimmten Treatments unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens postuliert wird. Der Einfluss der Lernpräferenz und der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg wurden mithilfe der klassifizierenden Testmodelle nicht näher untersucht.

4.4.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

Bei der Experimentalgruppe „Animation“ weisen 92,6% einen *Lernerfolg insgesamt* auf, wohingegen es in der Experimentalgruppe „Standbild“ nur 82,1% der Versuchspersonen sind. Der Klassenwechsel von der Klasse „Nicht-Könnern“ zur Klasse „Fakten“ kann in der Experimentalgruppe „Standbild“ von 69,2% der Versuchspersonen, in der Experimentalgruppe „Animation“ von nur 66,7% vollzogen werden. Damit besteht kein ein Unterschied im Erwerb von Faktenwissen. Beim Wechsel von den „Nicht-Könnern“ zu den „Könnern“ ist die Animationsversion eindeutig überlegen. Hier können 25,9% der Stichprobe Verständnis erwerben, wogegen es beim Lernen mit stehenden Bildern nur 15,4% der Versuchspersonen gelingt. Der Vergleich zwischen Personen ohne und mit Vorwissen kann für diese beiden Experimentalgruppen nicht vorgenommen werden, da die Stichproben hinsichtlich ihres Vorwissens homogen waren. Tabelle VI-32 fasst die dargestellten Ergebnisse zusammen.

Tabelle VI-32: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der den beiden Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs.

Art des Lernerfolgs	Standbild	Animation	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	82,1%	92,6%	10,5%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	69,2%	66,7%	2,5%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	15,4%	25,9%	10,5%

4.4.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Die Animationsversion ist nach dieser Analyse der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ im *Lernerfolg insgesamt* und beim *Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen* überlegen. Beim *Lernerfolg insgesamt* wechseln 5,8% mehr Versuchspersonen durch das Lernen mit den animierten Darstellungen in eine höhere Klasse. Den Wechsel von der Nicht-Köner-Klasse in die Klasse „Fakten“ vollziehen in der Experimentalgruppe „Animation“ 5,0% mehr als in den beiden Simulationsgruppen zusammen. Im *Erwerb von Verständnis* unterscheiden sich die Experimentalgruppen dagegen kaum. Damit erweist sich die animierte Darstellung gegenüber den Simulationen als genauso vorteilhaft für den *Erwerb von Verständnis* und im Hinblick auf den *Lernerfolg insgesamt* und für den *Erwerb von Faktenwissen* sogar als überlegen. Dies gilt insbesondere für Personen ohne Vorwissen, da bei diesem Vergleich wiederum keine Differenzierung in zwei Vorwissensgruppen vorgenommen werden konnte. Die Gruppen mit großem Vorwissen waren gar nicht oder zu schwach besetzt. Tabelle VI-33 zeigt alle Ergebnisse dieses Gruppenvergleichs.

Tabelle VI-33: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs

Art des Lernerfolgs	Animation	„Simulationen“	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	92,6%	86,8%	5,8%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	66,7%	61,6%	5,0%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	25,9%	27,4%	1,5%

4.4.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Um eine Aussage über die verständnisfördernde Wirkung von verschiedenen Instruktionen bei Personen ohne Vorwissen machen zu können, sollen abschließend noch einmal die beiden Simulationen, die „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und die „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“, miteinander verglichen werden. Auch bei diesem Vergleich konnte keine Differenzierung in zwei Vorwissensgruppen vorgenommen werden. Die Gruppen mit großem Vorwissen waren gar nicht oder zu schwach besetzt, daher können sich die Aussagen nur auf die Personengruppe ohne Vorwissen beziehen.

Es zeigte sich, dass die „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ der anderen Simulationsversion im Hinblick auf den *Lernerfolg insgesamt* und des Weiteren bezüglich des *Erwerbs von Faktenwissen* überlegen ist. Im Faktenwissen können 65,7% der Versuchspersonen dieser Experimentalgruppe ohne Vorwissen von den zusätzlichen Instruktionen der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ profitieren. Bei der weniger instruktional unterstützten Variante („Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“) wechseln dagegen nur 57,9% in die Klasse „Fakten“ und erwerben damit das entsprechende Wissen. Beim *Erwerb von Verständnis* ragt keine der beiden Simulationsversionen heraus: der Anteil der Versuchspersonen, die von der Nicht-Köner in die Köner-Klasse wechseln, ist für beide Simulationen in etwa gleich groß. Bei der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ erwerben 28,9% der Personen ohne Vorwissen Verständnis, während es in der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ nur 25,7% sind. In der Tabelle VI-34 wird eine zusammenfassende Übersicht dieser Ergebnisse gezeigt.

Tabelle VI-34: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs. IH: Abkürzung für „instruktionale Hilfestellungen“

Art des Lernerfolgs	Simulation mit IH 1	Simulation mit IH 2	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	84,6%	89,2%	4,6%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	57,9%	65,7%	7,8%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	28,9%	25,7%	3,2%

4.5 Zusammenfassung

Tabelle VI-35: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Studie 2 in tabellarischer Übersicht

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)
Kategorien des themenspezifischen Wissens bzgl. der Atmungskette	<ul style="list-style-type: none"> • Faktenwissen (definiert durch die Items 1-7 im Vor- und Nachtest) • Verständnis (definiert durch die Items 8-13 in Vor- und Nachtest) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Wissen (definiert durch das Itemprofil der Klasse 1; s. 4.3.5 in diesem Kapitel) • Faktenwissen (definiert durch das Itemprofil der Klasse 2; s. 4.3.5 in diesem Kapitel) • Verständnis (definiert durch das Itemprofil der Klasse 3; s. 4.3.5 in diesem Kapitel)
Messung des Lernerfolgs	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die Differenzen der Summenscores aus Nach- und Vortest, wobei nur die Items der entsprechenden Wissenskategorie berücksichtigt werden (s. IV 4.1.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die absoluten bzw. rel. Personenhäufigkeiten [N bzw. N%] für solche Klassenwechsel, die von einer niedrigen in eine höhere Klasse erfolgen (s. 4.3.6)
Deskriptive Statistik/ Lernerfolg für die gesamte Stichprobe	<ul style="list-style-type: none"> • M [SD] Lernzuwachs gesamt (Item 1-13): 3,34 [2,42] • M [SD] Zuwachs Faktenwissen (Item 1-7): 2,76 [1,58] • M [SD] Zuwachs Verständnis (Item 8-13): 0,59 [1,57] 	<ul style="list-style-type: none"> • N [N%] Lernerfolg gesamt: 114 [87%] • N [N%] Faktenwissen (ohne Vorwissen): 81 [64,3%] • N [N%] Verständnis (ohne Vorwissen): 31 [24,6%] • N [N%] Verständnis (mit Vorwissen): 2 [40%]

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)																					
Hypothese 1	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Standbild</td> <td>Animation</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Lernzuwachs gesamt:</td> <td>3,14 [2,43]</td> <td>4,37 [2,47]</td> </tr> <tr> <td>• Lernzuwachs gesamt p<0,1</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Standbild	Animation	• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	3,14 [2,43]	4,37 [2,47]	• Lernzuwachs gesamt p<0,1			<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Standbild</td> <td>Animation</td> </tr> <tr> <td>N % Lernerfolg insgesamt:</td> <td>82,1%</td> <td>92,6%</td> </tr> </table>		Standbild	Animation	N % Lernerfolg insgesamt:	82,1%	92,6%						
	Standbild	Animation																					
• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	3,14 [2,43]	4,37 [2,47]																					
• Lernzuwachs gesamt p<0,1																							
	Standbild	Animation																					
N % Lernerfolg insgesamt:	82,1%	92,6%																					
Hypothese 2	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Standbild</td> <td>Animation</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:</td> <td>2,50 [1,53]</td> <td>3,11 [1,93]</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Verständnis:</td> <td>0,64 [1,45]</td> <td>1,26 [1,29]</td> </tr> <tr> <td>• Keine signifikanten Effekte</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Standbild	Animation	• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	2,50 [1,53]	3,11 [1,93]	• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,64 [1,45]	1,26 [1,29]	• Keine signifikanten Effekte			<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Standbild</td> <td>Animation</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:</td> <td>69,2%</td> <td>66,7%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:</td> <td>15,4%</td> <td>25,9%</td> </tr> </table>		Standbild	Animation	• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	69,2%	66,7%	• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	15,4%	25,9%
	Standbild	Animation																					
• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	2,50 [1,53]	3,11 [1,93]																					
• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,64 [1,45]	1,26 [1,29]																					
• Keine signifikanten Effekte																							
	Standbild	Animation																					
• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	69,2%	66,7%																					
• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	15,4%	25,9%																					
Hypothese 3	<table border="0"> <tr> <td>M [SD] Zuwachs Verständnis</td> <td>Standbild</td> <td>Animation</td> </tr> <tr> <td>• Für geringes Vorwissen:</td> <td>0,61 [1,31]</td> <td>1,28 [1,34]</td> </tr> <tr> <td>• Für hohes Vorwissen:</td> <td>0,80 [2,17]</td> <td>1,00 [0,00]</td> </tr> <tr> <td>• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	M [SD] Zuwachs Verständnis	Standbild	Animation	• Für geringes Vorwissen:	0,61 [1,31]	1,28 [1,34]	• Für hohes Vorwissen:	0,80 [2,17]	1,00 [0,00]	• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte			-									
M [SD] Zuwachs Verständnis	Standbild	Animation																					
• Für geringes Vorwissen:	0,61 [1,31]	1,28 [1,34]																					
• Für hohes Vorwissen:	0,80 [2,17]	1,00 [0,00]																					
• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte																							
Hypothese 4	<ul style="list-style-type: none"> • Verbalisierer < Visualisierer für alle drei abhängigen Variablen • Standbild < Animation für alle drei abhängigen Variablen • Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte 	-																					

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)
Hypothese 5	<p style="text-align: right;">Animation Simulationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • M [SD] Lernzuwachs gesamt: 4,37 [2,47] 3,05 [2,33] • M [SD] Zuwachs Faktenwissen: 3,11 [1,93] 2,72 [1,47] • M [SD] Zuwachs Verständnis: 1,26 [1,29] 0,33 [1,64] • Lernzuwachs gesamt $p < 0,05$; Zuwachs Verständnis $p < 0,01$ • Einzelvergleich1: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1 < Animation • Lernzuwachs gesamt $p < 0,5$, Zuwachs Verständnis $p < 0,01$ • Einzelvergleich2: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2 < Animation • Lernzuwachs gesamt $p < 0,01$, Zuwachs Verständnis $p < 0,01$ 	<p style="text-align: right;">Animation Simulationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • N % Lernerfolg insgesamt: 92,6% 86,8% • N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen: 66,7% 61,6% • N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen: 25,9% 27,4%
Hypothese 6a	<p>M [SD] Zuwachs Verständnis Sim m. IH 1 Sim m. IH 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für geringes Vorwissen: 0,40 [1,74] 0,43 [1,61] • Für hohes Vorwissen: -0,25 [0,96] -0,14 [1,77] • Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte 	<p style="text-align: right;">Sim m. I 1 Sim m. IH 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • N % Lernerfolg insgesamt: 84,6% 89,2% • N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen: 57,9% 65,7% • N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen: 28,9% 25,7%
Hypothese 6b	<p>M [SD] kognitive Belastung Sim m. I. 1 Sim m. I. 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für geringes Vorwissen: 2,20 [0,72] 2,29 [0,87] • Für hohes Vorwissen: 1,78 [0,75] 1,55 [0,62] • Haupteffekt: hohes Vorwissen < geringes Vorwissen • $p < 0,05$ für die abhängige Variable kognitive Belastung 	-

5 DISKUSSION

Diese Studie hatte die Untersuchung der Wirksamkeit der unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten computergestützter Lernumgebungen auf das Erlernen eines komplexen biologischen Inhalts, der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran, zum Ziel. Dabei sollte geklärt werden, inwiefern Animation und Simulation dazu geeignet sind, das Verständnis dieses komplexen Lerngegenstandes zu fördern. Hierzu wurde außerdem der Einfluss der moderierenden Variablen Vorwissen und Lernpräferenz auf den Lernerfolg analysiert. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse zu den Forschungshypothesen diskutiert. Dabei sollen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Befunden, die in dieser Studie auf zwei ergänzenden Auswertungsverfahren beruhen, hergestellt und vor dem theoretischen Hintergrund der Multimediaforschung erörtert werden. Auf diese Weise werden die Ergebnisse in den aktuellen Forschungsstand eingebunden und gezeigt, inwieweit sich die positiven Wirkungen der genannten Gestaltungsweisen für einen biologischen Lerninhalt replizieren lassen.

Die nachfolgenden Abschnitte widmen sich somit der Diskussion der Forschungshypothesen. Abschnitt 1 diskutiert die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern. Im Abschnitt 2 wird die Wirksamkeit von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung dargestellt, bevor im Abschnitt 3 auf die Wirksamkeit von instruktionalen Maßnahmen beim Lernen mit Simulationen eingegangen wird. Im Abschnitt 4 werden die Lernergebnisse der Gesamtstichprobe unter Berücksichtigung des Vorwissens erörtert. Im Abschnitt 5 werden die berichteten und diskutierten Ergebnisse resümiert und im Ausblick auf die Studie 3 bewertet.

5.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

Der erste Hypothesenkomplex befasst sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von stehenden Bildern und Animationen. Dabei wird der Animation in Kombination mit Texten eine größere Wirksamkeit im Hinblick auf den Lernerfolg bei biologischen Prozessen zugeschrieben (Hypothese 1). Ferner wird erwartet, dass sich die spezifisch lernförderliche Wirkung der Animation auf das Verständnis beschränkt, wobei das Faktenwissen im Vergleich zum Lernen mit stehenden Bildern nicht verbessert werde (Hypothese 2). Bei Berücksichtigung der individuellen Lernermerkmale wird vermutet, dass sich die verständnisfördernde Wirkung der Animation vorwiegend bei Personen mit geringem Vorwissen einerseits (Hypothese 3) und andererseits bei Personen mit visueller Lernpräferenz, den Visualisierern, (Hypothese 4) entfaltet.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern im Hinblick auf den Lernzuwachs *gesamt* und differenziert nach der Lernleistung in die Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis*

In dieser Studie profitierten Personen der Experimentalgruppe „Animation“ stärker von ihrer Lernumgebung als Versuchspersonen der Experimentalgruppe „Standbild“. Die Unterschiede in den Mittelwerten werden für die abhängige Variable *Lernzuwachs gesamt* nicht signifikant. Hier kann lediglich eine statistische Tendenz festgestellt werden. Das Ergebnis der klassifizierenden Testauswertung untermauert die Überlegenheit der animierten Lernumgebung im Hinblick auf den gesamten Lernerfolg. In der Experimentalgruppe „Animation“ konnten 10% mehr der Versuchspersonen im Nachtest in eine höhere Klasse wechseln. Die Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen hätten gemäß der Hypothese 1 jedoch deutlicher ausfallen sollen, da Animationen Bewegungsabläufe von Elektronen und Protonen an der inneren Mitochondrienmembran in einer vollständigeren Weise präsentieren können als dies mit stehenden Bildern und ihren Bewegungsindikatoren der Fall ist. Vermutlich war den Versuchspersonen in der Experimentalgruppe „Standbild“ die Art und Weise der Darstellung so geläufig, dass sie ähnlich gute Lernergebnisse erzielen konnten wie die Personen in der Experimentalgruppe „Animation“. Die Hypothese 1 kann damit nicht bestätigt werden. Die bisherigen empirischen Befunde aus der Literatur scheinen nicht so ohne weiteres auf komplexe biologische Inhalte übertragbar zu sein. Auch die Aufschlüsselung des Wissenstest in die *Kategorien Faktenwissen* und *Verständnis* führt zu keinen signifikanten Unterschieden in den Lernleistungen. Die Ergebnisse der

Inferenzstatistik deuten in beiden Kategorien wiederum eine nicht signifikante Überlegenheit der Animationsversion an. Hierzu steht das Ergebnis der klassifizierenden Testauswertung hinsichtlich des *Erwerbs von Faktenwissen* im Widerspruch: Danach erwerben sogar mehr Personen der Experimentalgruppe „Standbild“ Faktenwissen.

Diese Diskrepanz ist in der Definition des Terminus *Faktenwissen* bei beiden Verfahren begründet. Während für den *Zuwachs Faktenwissen* bei den inferenzstatistischen Verfahren eine Differenz aus den Summenscores aller Faktenwissenitems aus Nach- und Vortest gebildet und bei der Berechnung des Mittelwerts die Gesamtstichprobe berücksichtigt wird, bezieht sich das Faktenwissen, das bei den klassifizierenden Testverfahren durch einen Wechsel in die Klasse „Fakten“ beschrieben wird, nur auf einen Teil der Stichprobe, der bestimmte Faktenwissenitems richtig beantwortet. Nicht berücksichtigt wird damit der Rest der Gesamtstichprobe und sein Erwerb von Faktenwissen (Faktenwissen wird aber auch gelernt, wenn Personen in die Könner-Klasse wechseln, s. Itemprofile 4.3.5 in diesem Kapitel). Von daher sind die Ergebnisse der beiden Verfahren in den *Kategorien Faktenwissen* nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, da die Operationalisierungen nicht deckungsgleich sind. Der klassifizierenden Testauswertung kommt hier die Ausdifferenzierung des varianzanalytischen Ergebnisses zu, indem die Itemprofile der latenten Klassen eine Aussage darüber erlauben, was überhaupt gelernt wird. Anhand der Klassenwechsel lässt sich jedoch insgesamt feststellen, dass die Stichproben in den beiden Experimentalgruppen deutlich häufiger Faktenwissen erwerben als das dahinterstehende Prinzip der Energiekonservierung zu erfassen und zu verstehen.

Bezogen auf den *Erwerb von Verständnis* unterscheiden sich die beiden Auswertungsverfahren in ihrer Tendenz nicht. In der Experimentalgruppe „Animation“ sind die Lernergebnisse im *Zuwachs Verständnis* besser als in der Experimentalgruppe „Standbild“. Auch können mehr Personen der Experimentalgruppe „Animation“ in die Könner-Klasse wechseln, die den Erwerb von Verständnis bei der klassifizierenden Testauswertung belegt. Durch diese Befunde kann insgesamt die Annahme nicht bestätigt werden, dass Animationen aufgrund der weitgehenden vollständigen Darstellung und damit der Erleichterung der Lernaufgabe durch Supplantation (Salomon, 1979) das tiefere Verständnis eines komplexen biologischen Vorgangs fördern (Rieber & Kini, 1991). In diesem Fall hätten die Verständnisleistungen der Experimentalgruppe „Animation“ im Unterschied zur Experimentalgruppe „Standbild“ deutlicher ausfallen müssen.

Die Hypothese 2 kann damit im Hinblick auf die verständnisfördernde Wirkung animierter Darstellungen nicht bestätigt werden. Für den Erwerb von Faktenwissen scheinen die beiden Lernumgebungen jedoch gleich gut geeignet zu sein. Damit bestätigt sich die Vermutung, dass die Gestaltungsweisen keinen unterschiedlichen Einfluss auf den Erwerb von Faktenwissen haben.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernvariable „Vorwissen“

Im Hinblick auf das Unterrichtsgeschehen sind beim Lernen mit Animationen wie bereits erwähnt weitere lernerspezifische Differenzierungen vorzunehmen. Wie in der Hypothese 3 formuliert, könnte das themenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen ein den Lernerfolg beeinflussender Faktor sein. In dieser Studie deutete sich unter Berücksichtigung des Vorwissens ein Interaktionseffekt beim *Zuwachs Verständnis* an: Personen mit geringen Vorwissen profitieren zwar deutlich, aber nicht signifikant, von der animierten Lernumgebung, während Personen mit hohem Vorwissen mit beiden Versionen der Lernumgebung ähnlich gut lernen. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die animierte Darstellung bei Personen mit geringem Vorwissen bei Vorwissensdefiziten kompensatorisch wirken könnten. Bei dieser Interpretation ist allerdings Vorsicht geboten: In dieser Studie gibt es nach der Clusteranalyse im Rahmen der inferenzstatistischen Verfahren nur sehr wenige Personen in den beiden Experimentalgruppen, die überhaupt über ein nennenswertes Vorwissen verfügen. Dieses Ergebnis wird auf der Basis der klassifizierenden Testauswertung noch deutlicher: Von der Gesamtstichprobe werden lediglich fünf Versuchspersonen bereits nach ihrem Vortestergebnis in die Klasse „Fakten“ eingeordnet. Von diesen Personen entfallen zwei auf die Experimentalgruppe „Standbild“ und keiner auf die Experimentalgruppe „Animation“. Die beiden Experimentalgruppen sollten daher als homogen hinsichtlich ihres Vorwissens angesehen werden. Ein direkter Vergleich zwischen Personen mit geringem und hohem themenspezifischen Vorwissen ist in dieser Stichprobe damit nicht gewährleistet.

Weiterhin erwirbt die gesamte Stichprobe aufgrund ihres Vorwissensdefizits während der Lernsitzung vorwiegend Faktenwissen. Dies belegen die Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung sehr deutlich. Lediglich in der Klasse „Köner“ kann von einem Erwerb von Verständnis gesprochen werden. Dieser Klasse gehören nach der Lernsitzung in der Experimentalgruppe „Animation“ ein Viertel der Versuchspersonen an; in der Experimentalgruppe „Standbild“ sind es derweil noch weniger Personen. Der Zuwachs im Verständnis ist damit allgemein so gering, dass auch die Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen zu gering ausfallen. Dies ist für die Deutung eines kompensatorischen Effekts der animierten Lernumgebung problematisch. Bei weiteren Studien sollte

gewährleistet sein, dass ein hinreichendes themenspezifisches Vorwissen vorhanden ist. Auf der Basis eines themenspezifischen Faktenwissens ließe sich der Zuwachs im Verständnis vermutlich deutlich erhöhen. Damit sollte auch der beobachtete nicht signifikante Interaktionseffekt abzusichern sein. Das Thema der Studie 3 „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ bietet hier unter Umständen eine bessere Ausgangslage, da es häufig von den Lehrkräften als Themenschwerpunkt im zweiten Schulhalbjahr der 11. Jahrgangsstufe ausgewählt und damit erschöpfender behandelt wird als die Vorgänge der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernervariable „Lernpräferenz“

Wie in der Hypothese 4 formuliert, könnte ein weiterer den Lernerfolg moderierender Faktor die individuelle Lernpräferenz der Versuchspersonen sein. Wird die individuelle Lernpräferenz bei der Datenanalyse als zweiter Faktor hinzugezogen, lässt sich ein weiterer, allerdings nicht signifikanter Haupteffekt vermuten. Hinsichtlich der abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* und *Zuwachs Verständnis* profitieren die Visualisierer von beiden computergestützten Lernumgebungen stärker als die Verbalisierer. Da in den Lernumgebungen „Standbild“ und „Animation“ bildliche Darstellungen dominieren, scheint die effektive Verwertbarkeit dieser visuellen Darstellungen durch die Versuchspersonen auch für das Erlernen von komplexen biologischen Vorgängen von Bedeutung zu sein. Dass Visualisierer auch in dieser Untersuchung stärker als Verbalisierer von den bildlichen Darstellungen in multimedialen Lernumgebungen (Standbilder, Animationen) für den Gesamtlernzuwachs und für das Verständnis profitieren, steht damit in Übereinstimmung mit Befunden zum Fremdsprachenlernen von Plass und Koautoren (1998).

5.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Die Hypothese 5 rückt die Lernwirksamkeit von Animationen im Vergleich zu Simulationen ins Zentrum des Interesses. Dabei werden den Simulationen eine größere Wirksamkeit im Hinblick auf das Verständnis der kausalen Zusammenhänge in einem komplexen biologischen System zugeschrieben.

Die varianzanalytische Auswertung der Studie 2 ergab jedoch, dass sich die animierte Lernumgebung positiver auf den Lernerfolg auswirkt als beide Simulationen. Dieses Resultat erreicht sowohl bei einem gemeinsamen Vergleich mit beiden Simulationsversionen als auch bei den beiden Einzelvergleichen im Hinblick auf die abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* und *Zuwachs Verständnis* das Signifikanzniveau. Dieses Ergebnis steht zunächst im Widerspruch zur Hypothese 5, die die Förderung des Verständnisses der kausalen Zusammenhänge durch Simulationen postulierte. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses sollte jedoch wieder die Qualität des Lernerfolgs mitberücksichtigt werden, die mithilfe der Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung ermittelt wurde. Auch bei der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ beruht der Lernerfolg in beiden Gruppen aufgrund des geringen Vorwissens bei ca. $\frac{2}{3}$ der Stichprobe auf dem ausschließlichen Erwerb von Faktenwissen. In der Experimentalgruppe „Animation“ gelingt der Wechsel in die Klasse „Fakten“ häufiger als bei Personen, die mit den Simulationen gearbeitet haben. Lediglich jeweils $\frac{1}{4}$ aller Versuchspersonen in den beiden Gruppen kann ein tieferes Verständnis für die Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran und ihrer Zusammenhänge erreichen. Nach der klassifizierenden Testauswertung ergibt sich für den Wechsel in die Könnern-Klasse sogar eine geringfügige Überlegenheit der beiden Simulationsversionen.

In ihrer Gesamtheit zeigen diese Ergebnisse, dass sich die Animation und die Simulationen wiederum gleich gut für den Erwerb von Faktenwissen eignen. Bezogen auf den Erwerb von Verständnis bezüglich der Kausalzusammenhänge an der inneren Mitochondrienmembran unterscheiden sich die Lernumgebungen auch nicht deutlich in ihrer Wirksamkeit voneinander.

Als mögliche Ursache für die geringen Verständnisleistungen könnten neben dem geringen Vorwissen der Stichproben in den Experimentalgruppen bei den Simulationsgruppen „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ auch auf die Art der Untersuchung in Frage kommen. Diese Studie wurde als Feldstudie in der Schule durchgeführt; im Rahmen einer Laborstudie wären die

Bedingungen der Studie u.U. besser zu kontrollieren gewesen. Ein großes Problem stellte dabei die zeitliche Begrenzung einer Lernsitzung durch die Schuldoppelstunde dar. In dieser Zeit waren die Animation sowie die beiden Simulationen von den entsprechenden Experimentalgruppe zu bearbeiten. Auf diese Weise wurde der ökologischen Validität Rechnung getragen: Es sollte sich zeigen, ob die Versuchspersonen von den Simulationen im gleichen Zeitrahmen bezüglich ihres Zuwachs im Verständnis der Kausalzusammenhänge profitieren können. Dass der explorative Umgang mit der Simulation, durch den sich die Versuchspersonen die biologischen Inhalte aktiv erschließen müssen, mehr Zeit in Anspruch nimmt als das lineare Durcharbeiten einer ausschließlich animierten Lernumgebung ohne interaktive Elemente, konnte nicht ausgeschlossen werden. Dies spiegelt sich in dem Ergebnis wider, dass 60% der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1“ sowie 73% der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“ angaben, mit der Bearbeitung der Lernumgebung nicht fertig geworden zu sein (s. IX 7).

5.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Die letzten beiden Hypothesen befassen sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von Simulationen. Beim Lernen mit Simulationen wird zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen ein positiver Einfluss auf die verständnisfördernde Wirkung der Lernumgebung zugeschrieben. Von diesen instruktionalen Hilfestellungen wird ferner angenommen, dass sie besonders Personen mit geringem Vorwissen zugute kommen (Hypothese 6a). Ferner wird erwartet, dass sich instruktionale Hilfestellungen reduzierend auf die kognitive Belastung beim Arbeiten mit Simulationen auswirken werden. Auch unter diesem Aspekt sollten sich die instruktionalen Hilfestellungen für Personen mit geringem Vorwissen stärker auswirken (Hypothese 6b).

Nach der varianzanalytischen Auswertung besteht kein Unterschied zwischen den beiden Lernumgebungen im Hinblick auf den Zuwachs in der Verständnisleistung weder für Personen mit geringem Vorwissen noch für Personen mit hohem Vorwissen. Bemerkenswerterweise erreichen sogar Personen mit geringem Vorwissen generell bessere Lernergebnisse als Personen, die nach der Clusteranalyse der Gruppe mit hohem Vorwissen zugeordnet wurden. Dieses Ergebnis ist allerdings statistisch nicht signifikant. Die klassifizierende Testauswertung ergab jedoch im Fall der beiden Simulationsgruppen, dass diese beiden Treatments hinsichtlich ihres Vorwissens homogen sind. Alle Personen der beiden Simulationsgruppen verfügen ähnlich wie die anderen beiden Experimentalgruppen

nur über ein geringes themenspezifisches Vorwissen. Das kontraintuitive Ergebnis der Varianzanalyse, das einen größeren Zuwachs im Verständnis bei Personen mit geringem Vorwissen zeigte, könnte sich daher so erklären lassen, dass bei der Einteilung der Personen durch die Clusteranalyse überdurchschnittlich viele Personen in den Cluster „hohes Vorwissen“ eingeordnet worden sind, die die Faktenwissenitems im Vortest nur zufällig richtig beantwortet hatten. Im Hinblick auf den *Erwerb von Verständnis* liefert die klassifizierende Testauswertung im Vergleich zur varianzanalytischen Auswertung keine neuen Erkenntnisse. In beiden Experimentalgruppen gelingt jeweils ca. $\frac{1}{4}$ der Stichprobe der Wechsel in die Könner-Klasse. Demnach unterscheiden sich die beiden Simulationsversionen hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit für den *Erwerb von Verständnis* nicht. Eine besonders verständnisfördernde Wirkung insbesondere der instruktionalen Hilfestellungen für Personen mit geringem Vorwissen kann anhand dieser Stichprobe nicht belegt werden; die Hypothese 6a wird damit nicht bestätigt.

Dass die in dieser Studie verwendeten zusätzlichen instruktionalen Unterstützungen der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“ keine Wirksamkeit für den *Zuwachs Verständnis* zeigten, könnte daran liegen, dass die Versuchspersonen die angebotenen Hilfestellungen nicht konsequent genutzt haben. Dafür sprechen Beobachtungen während der Lernsitzung. In diesem Fall unterscheiden sich die Lernumgebungen der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1“ und die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“ praktisch nicht mehr. Die zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen wurden in Form eines Handbuches getrennt von den Lernumgebungen im Computer an den Arbeitsplätzen ausgelegt. Dieses enthielt sowohl eine Lernanleitung (Fischer & Mandl, 1990) als auch zusätzliche Basisinformationen. Den Probanden einen steten selbstbestimmten Zugriff auf solche zusätzlichen Basisinformationen zu gewähren, hatte sich in einer Untersuchung von Leutner (1993) als lernförderlich erwiesen. In der vorliegenden Studie erwiesen sich damit diese beiden Formen der zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen in Kombination und in der hier verwendeten Darreichungsform als suboptimal. Dabei könnte Lernerfolg auch wiederum durch den schulischen Kontext behindert worden sein. Damit die instruktionalen Unterstützungen ihre volle Wirksamkeit entfalten können, ist ein größerer Zeitaufwand im Vergleich zur Bearbeitung einer Simulation ohne instruktionale Unterstützung nötig. Da der Zeitrahmen der Lernsitzung aber durch die Schuldoppelstunde begrenzt war, blieb entsprechend wenig Zeit für die Bearbeitung der Simulation mit instruktionaler Unterstützung (Leutner, 1993). Insgesamt konnte die Vermutung also nicht bestätigt werden, dass zusätzliche instruktionale Unterstützungen in Form von Lernanleitungen und Basisinformationen in Kombination einen positiven Einfluss auf den Verständniserwerb beim Lernen mit Simulationen im Biologieunterricht haben.

Die *kognitive Belastung* beim Arbeiten mit Simulationen ist nach der varianzanalytischen Auswertung vom Vorwissen der Versuchspersonen abhängig: Personen mit geringem Vorwissen fühlten sich durch beide Simulationen signifikant stärker kognitiv belastet als Personen mit hohem Vorwissen. Die zusätzlichen Unterstützungen der „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“ wirkten sich bei beiden Vorwissensgruppen jedoch unterschiedlich aus. Während sie bei Personen mit hohem Vorwissen eine Senkung der kognitiven Belastung erreichen, forcieren die zusätzlichen Hilfestellungen bei Personen mit geringem Vorwissen die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung. Dieser Interaktionseffekt erreicht jedoch nicht das Signifikanzniveau. Entgegen der Erwartung besteht aber in dieser Studie kein signifikanter Zusammenhang zwischen der *kognitiven Belastung* und dem *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* sowie dem *Zuwachs Verständnis*. Lediglich zwischen dem *Zuwachs Faktenwissen* und der *kognitiven Belastung* besteht eine sehr schwache negative Korrelation. Demnach kann eine besondere kognitiv entlastende Wirkung der hier verwendeten instruktionalen Hilfestellungen insbesondere für Personen mit geringem Vorwissen ebenfalls nicht nachgewiesen werden. Damit kann auch die Hypothese 6b anhand der Daten dieser Studie nicht bestätigt werden.

Dass die Simulationen insbesondere bei Versuchspersonen mit geringem Vorwissen zu einer starken kognitiven Belastung führten und dass die hier verwendeten zusätzlichen instruktionalen Unterstützungen in Form des Handbuchs keine kognitive Entlastung bewirkten, lässt sich vor dem Hintergrund der „Cognitive Load Theory“ (Chandler & Sweller, 1991; Sweller et al., 1998) erklären. Die Theorie betrachtet Aspekte der menschlichen Gedächtnisstruktur sowie mögliche Informationsstrukturen eines instruktionalen Designs, das Verständnis und Problemlösen ermöglichen soll. Im Hinblick auf die Organisation des Gedächtnisses wird angenommen, dass die Begrenzung des Arbeitsgedächtnisses nur die gleichzeitige Prozessierung einiger Elemente einer Gesamtinformation erlaubt. Demzufolge kommt dem Langzeitgedächtnis eine wichtige Rolle bei der Überwindung von Schwierigkeiten zu, die durch diese Begrenzung des Arbeitsgedächtnisses entstehen. Im Langzeitgedächtnis werden z. B. Schemata zur Strukturierung von Wissen vorgehalten. Ein Schema entsteht dadurch, dass Einzelinformationen zu einer Informationseinheit höherer Ordnung zusammengefasst werden. Wird ein bereits vorhandenes Schema ins Arbeitsgedächtnis gerufen, wird es dort als Einzelinformation behandelt. Auf diese Weise bewirken Schemata eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses. Werden Schemata jedoch bewusst modifiziert, so geht damit wiederum eine starke Belastung des Arbeitsgedächtnisses einher. Anzustreben ist daher eine automatische Prozessierung von Schemata, die sich jedoch erst nach langandauernder Praxis einstellt.

Hinsichtlich des instruktionalen Designs unterscheidet die „Cognitive Load Theory“ verschiedene Quellen der kognitiven Belastung. Als intrinsischen kognitive Belastung

(*intrinsic cognitive load*) einer Information wird diejenige bezeichnet, die vom Lerninhalt selbst ausgeht und damit durch die Gestaltung des Lernmaterials auch nicht zu beeinflussen ist. Hierbei ist entscheidend, wie viele Einzelelemente des Lerngegenstandes gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten und verarbeitet werden müssen, um die Zusammenhänge zu verstehen. Daher ist die intrinsische kognitive Belastung eines Lerninhalts umso größer, je stärker seine einzelnen Elemente durch Wechselwirkungen und Kausalbeziehungen miteinander verknüpft sind. Eine zusätzliche äußere kognitive Belastung (*extraneous cognitive load*) wird durch die Art und Weise der Gestaltung des Lernmaterials bewirkt und kann damit durch umsichtige Konstruktion von Lernmaterial kontrolliert werden (Sweller et al., 1998; Moreno & Mayer, 2000, 2002).

Ein hochkomplexer Gegenstand mit vielen Wechselwirkungen und Querbezügen zwischen seinen Elementen wie die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran ist damit ein Lerngegenstand von hoher intrinsischer kognitiver Belastung. Unabhängig von der instruktionalen Gestaltung kann er nicht verstanden werden, wenn nicht alle relevanten Elemente gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis prozessiert werden können (Chandler & Sweller, 1996; Marcus et al., 1996; Sweller, 1994). Wie eben erläutert, wird dieses Problem gewöhnlich durch Schemakonstruktion und ihren Abruf aus dem Langzeitgedächtnis umgangen. Schwierigkeiten entstehen, wenn solch Schema zum ersten Mal konstruiert werden muss, also genau dann, wenn ein Lerner über kein oder nur ein geringes themenspezifisches Vorwissen verfügt (Pollock et al., 2002). Dies allein erklärt die signifikant höhere kognitive Belastung bei Personen mit geringem Vorwissen und ferner ihre geringen Verständnisleistungen.

Darüber hinaus konfrontiert die Lernumgebung Simulation, in denen die Lernenden mehrere Parameter verändern können, die Versuchspersonen ferner nicht nur mit dem unbekanntem Lerninhalt, sondern auch noch mit unterschiedlichen Zuständen und Abläufen desjenigen Systems, über das erst strukturiertes Wissen erworben werden soll. Die Notwendigkeit, dabei einerseits Art und Reihenfolge der Eingriffe sinnvoll auszuwählen und andererseits aus dem damit generierten Systemverhalten auf dessen Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten zu schließen, kann bei den Lernenden mit geringem Vorwissen zu einer zusätzlichen äußeren kognitiven Belastung (*extraneous cognitive load*) geführt haben. Die Gestaltung der Lernsituation muss daher mit dem domänenspezifischen Vorwissen der Lernenden abgestimmt sein, um diese kognitive Überlastung zu vermeiden (Schnotz et al., 1998). Die zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen, die diese externe kognitive Belastung durch die Lernumgebung bei Personen mit geringem Vorwissen reduzieren sollte, erwiesen sich als nicht wirksam, sondern erhöhte die äußere kognitive Belastung noch.

5.4 Vorwissen und Lernerfolg

In dieser Studie wurde die Wirkung von Animation und Simulation auf das Verständnis eines komplexen biologischen Lerngegenstandes untersucht, wobei dem Vorwissen eine moderierende Rolle im Hinblick auf den Lernerfolg zugeschrieben wird. Aus diesem Grund soll das Vorwissen der Stichprobe noch einmal separat für die gesamte Stichprobe auf der Basis der deskriptiven Statistik und der Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung diskutiert werden. Die Höhe und Art des themenspezifischen Vorwissens wird darüber hinaus Rückschlüsse auf die Quantität und Qualität des Lernerfolgs zulassen.

Das *themenspezifische Vorwissen* bezüglich der Atmungskette, das bei der varianz-analytischen Auswertung durch den Summenscore der Faktenwissenitems im Vortest operationalisiert wurde, ist bereits auf Basis der deskriptiven Statistik in der Gesamtstichprobe als gering einzustufen. Die Clusteranalyse zur Einteilung zweier Vorwissensgruppen ergab einen Cluster „hohes Vorwissen“, dem nur 18 von 131 Personen zugeordnet wurden. Selbst in dieser Gruppe wurde aber nur die Hälfte der maximal erreichbaren Punkte als Höchstwert in der Kategorie Faktenwissen im Vortest erzielt. Weiteren Aufschluss über den Vorwissensstand der Stichprobe ergab erst die Anwendung eines klassifizierenden Testmodells. Dabei zeigte sich, dass lediglich fünf Personen nach ihrem Vortestergebnis der Fakten-Klasse zugeordnet wurden; diese verfügten nach dem Itemprofil dieser Klasse über ein definiertes Faktenwissen, das als themenspezifisches Vorwissen gewertet werden kann. Da 95% der Stichprobe nach ihrem Vortestergebnis der Nicht-Könnner-Klasse zugeordnet wurden, die alle Items mit Zufallswahrscheinlichkeit richtig beantwortete, verfügte die Mehrheit der Versuchspersonen damit möglicherweise über keinerlei oder nur sehr geringes themenspezifisches Vorwissen in Bezug auf die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran. Diese Ergebnisse zeigen, dass Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Vorwissensgruppen hinsichtlich der Wirksamkeit der verschiedenen Lernumgebungen in dieser Stichprobe problematisch sind. Die Forschungshypothesen könnten damit eigentlich anhand dieser Stichprobe nur eingeschränkt auf Personen mit geringem themenspezifischen Vorwissen beurteilt werden.

In unmittelbarem Zusammenhang mit den geringen Vorkenntnissen ist die *Quantität und die Qualität des Lernerfolgs* zu sehen. Die deskriptive Statistik weist für die Gesamtstichprobe (unabhängig vom Vorwissen) einen *Lernzuwachs gesamt* auf, der zu 80% auf den Zuwachs in der Kategorie Faktenwissen zurückzuführen ist. Die Stichprobe lernte also vermehrt Faktenwissen. Im Verständnis wurden dagegen nur geringe Zuwächse erzielt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verständnisitems für die Stichprobe aufgrund ihres geringen Vorwissensstandes auch nach der Lernsitzung noch zu schwer waren. Hinsichtlich der Art des Lernerfolgs lieferten die Itemprofile der latenten Klassen ein wesentlich differenzierteres Bild als dies durch deskriptiven Statistiken der Kategorien Faktenwissen und Verständnis möglich war. Das Profil der Klasse „Fakten“ spezifiziert das Faktenwissen, das von den Versuchspersonen im Verlauf der Lernsitzung erworben wurde. So ist die Reaktionsgleichung der Atmungskette und ihre Stöchiometrie im Sinne der Knallgasreaktion den Personen bekannt, die dieser Klasse auf der Basis ihres Nachtestergebnisses zugeordnet wurden. Des Weiteren haben diese Versuchspersonen die Funktionsweise der Proteinkomplexe der inneren Mitochondrienmembran und damit die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport an den Proteinkomplexen als Vorgang in groben Zügen erfasst. Ein tieferes Verständnis der Kopplung von Elektronen- und Protonentransport mit dem Aufbau des Protonengradienten als notwendige Voraussetzung für die Synthese von ATP erlangt diese Klasse aber nicht. Erst die Klasse „Köner“ verfügt neben einem sicheren Faktenwissen über die Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran auch über ein gewisses Verständnis für den Zusammenhang von Elektronentransport, Protonentransport und ATP-Synthese. Insbesondere ist den Versuchspersonen der Köner-Klasse die Bedeutung des Protonengradienten als verbindendes Element zwischen Elektronentransport an den Komplexen der inneren Mitochondrienmembran und der ATP-Synthese im Ansatz geläufig. Sind die Lösungswahrscheinlichkeiten in dieser Klasse auch am größten, so darf aber nicht übersehen werden, dass die Mehrheit der Verständnisitems auch von dieser Klasse nur mit geringen Wahrscheinlichkeiten richtig gelöst wird.

Ingesamt bestätigen diese Befunde in differenzierter Weise das Ergebnis der deskriptiven Statistik, dass die gesamte Stichprobe vorwiegend Faktenwissen erwirbt. Ferner belegen die Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung deutlich, dass einige der Verständnisitems die drei latenten Klassen nicht optimal trennen. Diese Items werden von allen drei Gruppen und damit von der Gesamtstichprobe eher zufällig richtig beantwortet. Die geringen Trennschärfen und zudem die geringen Lösungswahrscheinlichkeiten dieser Items zeigen, dass die Verständnisitems für den Vorwissensstand der Personen zu schwer waren, wie dies bereits nach der deskriptiven Statistik vermutet wurde. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Stichprobe hinsichtlich ihres Vorwissens fast vollständig homogen war und über kein bzw. sehr geringes Vorwissen verfügte. Auf der Basis dieses Vorwissens

erwarb die Stichprobe in der Lernsitzung vorwiegend Faktenwissen. Die Verständnisitems waren für die Versuchspersonen auch nach der computergestützten Lernsitzung noch zu schwer zu beantworten, so dass ein deutlicher Lernerfolg in der Kategorie Verständnis nicht nachgewiesen werden konnte.

5.5 Schlussfolgerungen für die Studie 3

In dieser Studie ergab sich die Situation, dass der Lerngegenstand, die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran, mit seinen vielen Wechselwirkungen und Querbezügen aufgrund des geringen themenspezifischen Vorwissens und der damit einhergehenden Fehlen von Schemata im Langzeitgedächtnis, nicht adäquat bearbeitet und verstanden werden konnte. Ferner führte dies zur starken kognitiven Belastung insbesondere beim Arbeiten mit Simulationen, bei denen neben der genannten intrinsischen kognitiven Belastung durch den Lerninhalt noch eine weitere Art der kognitiven Belastung durch die Gestaltung der Lernumgebungen und ihrer Instruktionen auftrat. Das Thema der Studie 3 „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ bietet in Bezug auf das Vorwissen unter Umständen eine bessere Ausgangslage, da es häufig von den Lehrkräften als Themenschwerpunkt im zweiten Schulhalbjahr der 11. Jahrgangsstufe ausgewählt und damit erschöpfender behandelt wird als die Vorgänge der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran. Auf dieser Basis ließe sich die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses senken und der Zuwachs im Verständnis so vermutlich deutlich erhöhen. Beim Lernen mit Simulationen ist darüber hinaus weiterhin die Frage offen, wie instruktionale Maßnahmen gestaltet sein müssen, um die externe kognitive Belastung zu reduzieren und dadurch insbesondere Personen mit geringem Vorwissen beim Wissenserwerb wirksam zu unterstützen. Hier sollte gewährleistet sein, dass die instruktionalen Hilfestellungen strikte Beachtung durch die Versuchspersonen finden. Dies wird in Studie 3 dadurch sichergestellt, dass die instruktionalen Hilfestellungen sämtlich in die Lernprogramme integriert werden. Zur Senkung der äußeren kognitiven Belastung sollte eine weitere Simulationsvariante eingeführt werden, die sich auf ein Minimum an instruktionaler Unterstützung in Form von Aufgaben und Lernkontrollfragen beschränkt, die also ohne zusätzliche instruktionale Hilfestellungen strategischer und inhaltlicher Art auskommt. Durch diese Maßnahmen dürften sich einerseits die verschiedenen Simulationsgruppen deutlicher unterscheiden, andererseits ist so mit einer weiteren Zeitersparnis und einer Senkung der kognitiven Belastung zu rechnen.

VII STUDIE 3

PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHESE

In der dritten Studie des Projekts wurden der Aufbau und die Funktion der Thylakoidmembran in Chloroplasten thematisiert. Im Abschnitt 1 dieses Kapitels werden die komplexen biologischen Inhalte, die Primärreaktionen der Fotosynthese an der Thylakoidmembran, aus der fachwissenschaftlichen Perspektive zusammenfassend dargestellt. Daran anschließend wird im Abschnitt 2 auf die didaktische Reduktion der fachlichen Inhalte im Hinblick auf den Lehrplan in der gymnasialen Oberstufe eingegangen. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit dem in dieser Studie verwendeten Material und den hier angewendeten Methoden. Insbesondere wird die Präsentation der Thematik in den verschiedenen Lernumgebungen in diesem Abschnitt detailliert beschrieben. Der Abschnitt 4 befasst sich mit der Darstellung der Ergebnisse. Diese basieren wiederum auf einer inferenzstatistischen Analyse der Daten, sowie ergänzend auf einer qualitativen Testauswertung mit probabilistischen Modellen. Im Abschnitt 5 werden diese Ergebnisse vergleichend diskutiert.

1 DIE PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHESE AUS FACHWISSENSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE

Chloroplasten in Pflanzen nutzen die Lichtenergie der Sonne, um aus Wasser und Kohlenstoffdioxid organische Substanzen (Zucker) zu produzieren. Diesen Vorgang bezeichnet man als Fotosynthese. Formal entspricht er der Umkehrung der Zellatmung. Die Fotosynthese gliedert sich in zwei Reaktionsabläufe, die in unterschiedlichen Kompartimenten des Chloroplasten lokalisiert sind. Die Primärreaktionen sind an die Thylakoidmembran gebunden. Hier befindet sich ein Proteinkomplex, der mit Hilfe der Lichtenergie Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff spaltet (oxidiert). Während der Sauerstoff an die Umgebung abgegeben wird, werden die Elektronen des Wasserstoffs über eine Elektronentransportkette auf den Elektronenakzeptor NADP^+ übertragen, der unter Aufnahme von Protonen zu $\text{NADPH}+\text{H}^+$ reduziert wird. Ähnlich wie bei der Atmungskette ist auch dieser Elektronentransport im Chloroplasten mit der Erzeugung eines Protonengradienten über der Thylakoidmembran verbunden, der die Synthese von ATP antreibt. In einer zweiten Reaktionsfolge, den Sekundärreaktionen, wird aus Kohlenstoffdioxid über Triosephosphate schrittweise der Zucker Glucose aufgebaut. Hierfür wird Kohlenstoffdioxid mit Hilfe des in den Primärreaktionen gebildeten $\text{NADPH}+\text{H}^+$ reduziert und unter Energieverbrauch mit

weiteren reduzierten Kohlenstoffdioxidmolekülen verknüpft. Die Energie, die für diese Verknüpfungen notwendig ist, wird durch ATP bereitgestellt. Im Folgenden sollen der Aufbau der Thylakoidmembran und die Primärreaktionen der Fotosynthese näher betrachtet werden.

1.1 Bau und Funktion der Thylakoidmembran

Ähnlich wie die innere Mitochondrienmembran ist auch die Thylakoidmembran mit verschiedenen Proteinkomplexen bestückt, die beim fotosynthetischen Elektronentransport zusammenarbeiten. Fotosystem II, der Cytochrom- b_6/f -Komplex und Fotosystem I sind an der Elektronenübertragung von Wasser auf NADP^+ beteiligt. Die Fotosysteme liefern für diesen Elektronentransport die notwendige Energie. Hinzu kommt ein weiterer Komplex für die Bildung des Energieäquivalents ATP, die ATP-Synthase, dessen Aufbau schon bei der inneren Mitochondrienmembran vorgestellt wurde.

Die Fotosysteme II und I der Thylakoidmembran unterscheiden sich grundlegend von den übrigen Proteinkomponenten dieser Membran. Ihre Reaktionszentren enthalten besondere Pigmente, ein Paar von Chlorophyll-a-Molekülen, aus dem bei ausreichender Anregung durch Lichtenergie Elektronen freigesetzt werden können. Eine ausreichende Anregung dieses Chlorophyll-a-Molekülpaars im Reaktionszentrum wird durch die lichtsammelnden Antennenkomplexe gesichert, die mit den Fotosystemen assoziiert sind und die in großer Anzahl die lichtabsorbierenden Pigmente Chlorophyll a und b und akzessorische Pigmente wie Carotinoide enthalten. Diese Pigment-Protein-Komplexe befinden sich hochgeordnet in enger räumlicher Anordnung zueinander. Auf diese Weise kann die Lichtenergie effektiv konzentriert und gerichtet zum Reaktionszentrum geleitet werden. Jedes der beiden Fotosysteme verfügt dabei über seine eigenen Lichtsammlerkomplexe, die sich in ihrem Aufbau unterscheiden. Zum Kernbereich des Fotosystems II gehören vier Untereinheiten, die alle die Thylakoidmembran durchspannen. Zwei der Untereinheiten tragen bis zu 30 Chlorophyll-a-Moleküle und haben wie die Antennenkomplexe Lichtsammlerfunktion. Die anderen beiden Untereinheiten bilden das Reaktionszentrum, von wo aus die eigentliche fotochemische Reaktion startet. Des Weiteren enthält der Kernbereich des Fotosystems II die Komponenten des wasserspaltenden Komplexes. Dieser ist peripher an die Lumenseite der Thylakoidmembran gebunden und enthält als prosthetische Gruppe einen Mangan-Cluster, der für die Wasserspaltung essentiell ist.

Der Elektronentransport zwischen den beiden Fotosystemen wird durch eine Elektronentransportkette unter Beteiligung von Plastochinon, dem Cytochrom- b_6/f -Komplex und Plastocyanin bewerkstelligt. Plastochinon gehört zu den Lipiden und ist infolgedessen lateral in der Thylakoidmembran beweglich. Es vermittelt den Elektronentransport zwischen dem

Fotosystem II und dem Cytochrom- b_6/f -Komplex. Der Cytochrom- b_6/f -Komplex ist ein integraler Proteinkomplex, der im Aufbau dem Komplex III der Atmungskette sehr ähnlich ist. Als prosthetische Gruppen fungieren ein Häm b und Häm c sowie ein Eisen-Schwefel-Zentrum. Der Elektronentransport zwischen dem Cytochrom- b_6/f -Komplex und dem Fotosystem I wird durch Plastocyanin vermittelt. Plastocyanin ist ein peripheres Membranprotein an der Lumenseite der Thylakoide, das ein reduzierbares Kupferion enthält.

Das Fotosystem I verfügt wie das Fotosystem II über einen Lichtsammelkomplex, der allerdings weniger kompliziert gebaut ist. Der Kernbereich besteht aus mindestens 12 Untereinheiten, von denen die beiden größten das eigentliche Reaktionszentrum bilden. Diese Untereinheiten sind mit Chlorophyllmolekülen bestückt, die als „interne“ Antennen fungieren. Des Weiteren enthält das Reaktionszentrum des Fotosystems I ein Chlorophyllpaar, von dem aus die fotochemische Reaktion gestartet wird. Das durch die Lichtanregung freigesetzte Elektron wird über ein Chlorophyllmonomer, Phyllochinon und drei verschiedene Eisenschwefelzentren im Fotosystem II auf Ferredoxin übertragen. Ferredoxin ist ein peripheres Membranprotein an der Stromaseite der Thylakoidmembran und enthält als prosthetische Gruppe ein Eisen-Schwefel-Zentrum. Ferredoxin reduziert unter Mitwirkung der Ferredoxin-NADP-Reduktase NADP^+ zu $\text{NADPH} + \text{H}^+$.

Das Enzym der ATP-Synthese, die ATP-Synthase, befindet sich ebenfalls in der Thylakoidmembran. Es ist praktisch gleich aufgebaut wie das entsprechende Enzym der Mitochondrien. Die ATP-Synthase (F_1/F_0 -Komplex) der Thylakoidmembran ist ein integrales Membranprotein. Es synthetisiert unter Ausnutzung eines transmembranen Protonengradienten ATP aus ADP und anorganischem Phosphat. Dieses Enzym besteht aus einem integralen Faktor (F_0) und einem zum Stroma gewandten peripheren Faktor (F_1). Der integrale Faktor bildet einen Protonenkanal durch die Membran, während am peripheren Teil ATP synthetisiert wird.

Die Vorgänge an der Thylakoidmembran sollen im folgenden Abschnitt im Detail beschrieben werden.

1.2 Die Primärreaktionen der Fotosynthese im Detail

Durch die Lichtenergie der Sonne werden die beiden Fotosysteme angeregt und treiben so die Oxidation von Wasser, die Reduktion von NADP^+ und die Synthese von ATP an. Der Elektronentransport an der Thylakoidmembran kann auf zwei Wegen erfolgen, nicht-zyklisch und zyklisch.

1.2.1 Nichtzyklischer Elektronentransport

Werden die Chlorophyllmoleküle im Reaktionszentrum des Fotosystem II durch Licht angeregt, erreichen die Elektronen ein höheres Energieniveau. Bei ausreichender Anregung verlässt ein Elektron das Chlorophyll-a-Molekülpaar im Reaktionszentrum. Es wird von einem primären Elektronenakzeptor im Fotosystem II aufgenommen und anschließend an Plastochinon weitergegeben.

Das Elektron hinterlässt eine Elektronenlücke im Chlorophyllmolekül, das dadurch zu einem sehr starken Oxidationsmittel wird. Die entstandene Elektronenlücke im Chlorophyll-a-Molekülpaar wird von einem Elektron aufgefüllt, das aus der Oxidation des Wassers stammt. Unter Beteiligung des Mangan-Clusters am Fotosystem II werden vier Elektronen von zwei Wassermolekülen aufgenommen. Dabei entstehen molekularer Sauerstoff O_2 und vier Protonen. Diese Reaktionsprodukte werden ins Thylakoidlumen freigesetzt. Der wasserspaltende Komplex überträgt ein Elektron auf das Chlorophyllmolekül im Reaktionszentrum.

Durch wiederholte Anregung des Fotosystems II wird ein weiteres Elektron auf das obengenannte Plastochinon übertragen. Während die Elektronenlücke im Chlorophyllmolekül auf die beschriebene Weise wieder aufgefüllt wird, nimmt das Plastochinon zusätzlich zwei Protonen aus dem Stroma auf und wird damit zum Plastohydrochinon reduziert. Das Plastohydrochinon löst sich vom Fotosystem II und diffundiert durch die Thylakoidmembran zum Cytochrom- b_6/f -Komplex. Der Cytochrom- b_6/f -Komplex überträgt die Elektronen einzeln auf Plastocyanin. Dabei werden die beiden Protonen des Plastohydrochinons und zusätzlich zwei weitere Protonen aus dem Stroma ins Thylakoidlumen befördert¹⁵.

Fotosystem I wird ebenfalls durch Lichtenergie angeregt. Auch hier führt die Anregung eines speziellen Chlorophyll-a-Molekülpaares zu einer Ladungstrennung. Während das angeregte Elektron über verschiedene prosthetische Gruppen im Fotosystem I auf Ferredoxin übertragen wird, wird die Elektronenlücke im Reaktionszentrum des Fotosystems I durch ein vom Plastocyanin herantransportiertes Elektron wieder aufgefüllt. Abschließend wird NADP^+

durch zwei Moleküle Ferredoxin unter Aufnahme von zwei Protonen aus dem Stroma zu $\text{NADPH} + \text{H}^+$ reduziert. Diese Reaktion wird durch die NADP^+ -Reduktase katalysiert. $\text{NADPH} + \text{H}^+$ dient nachfolgend als Reduktionsmittel für die Sekundärreaktionen der Fotosynthese und andere Syntheseprozesse im Chloroplasten.

Der beschriebene Vorgang der NADP^+ -Reduktion wird bezogen auf das am wasserspaltenden Komplex gebildete Sauerstoffmolekül ein weiteres Mal durchlaufen. So werden schließlich alle vier Elektronen auf NADP^+ übertragen, die bei der Oxidation von Wasser auf den Komplex am Fotosystem II übertragen worden sind. Dabei werden weitere Protonen vom Stroma ins Thylakoidlumen gepumpt. Damit wird der Protonengradient über der Thylakoidmembran weiter verstärkt, der zur ATP-Synthese genutzt wird.

1.2.2 Zyklischer Elektronentransport

Beim zyklischen Elektronentransport fließen die Elektronen vom Fotosystem I aus über Ferredoxin und den Cytochrom- b_6/f -Komplex wieder zum Fotosystem I zurück. Dieser Prozess trägt ebenfalls zum Aufbau des Protonengradienten bei, der zur ATP-Synthese genutzt wird. Vermutlich wird der Ablauf des zyklischen Elektronentransports vom Verhältnis von NADP^+ zu $\text{NADPH} + \text{H}^+$ bestimmt. Liegt im Chloroplasten relativ viel $\text{NADPH} + \text{H}^+$ vor, wird der zyklische Elektronentransport gefördert. Dieser dient offenbar dazu, die Bereitstellung von ATP und $\text{NADPH} + \text{H}^+$ der jeweiligen Situation anzupassen.

1.2.3 ATP-Synthese

Der Mechanismus der ATP-Synthese nach der „Binding-Change-Hypothese“ wurde bereits im Abschnitt VI 1.2.2 beschrieben. Es wird angenommen, dass er in analoger Weise für die ATP-Synthase im Chloroplasten gilt.

2 DIE PRIMÄRREAKTIONEN DER FOTOSYNTHESE AUS DIDAKTISCHER PERSPEKTIVE

Ausgehend von der Atmungskette mit dem Prozess der biologischen Oxidation von $\text{NADH} + \text{H}^+$ als energieliefernde Reaktion, die in der Studie 2 behandelt wurde, werden die Primärreaktionen der Fotosynthese als Umkehrung dieses Prozesses problematisiert. Die Einsicht in die Notwendigkeit der Energiezufuhr folgt daraus unmittelbar. Die Darstellung der prinzipiellen Umkehrbarkeit von chemischen Reaktionen erforderte keine detaillierteren

Kenntnisse der zugrundeliegenden Redoxreaktionen auf physikalisch-chemischer Ebene. Auch wurde diese Ebene in den Lernumgebung aus den unter VI 2 genannten Gründen nicht weiter vertieft. Damit wurde wie bei der Studie 2 nur auf chemisches Allgemeinwissen rekurriert. Die Darstellung der Primärreaktionen der Fotosynthese wurde auf die biochemischen Prozesse an der Thylakoidmembran beschränkt. Auf die eingehende Beschreibung der Antennenkomplexe, ihrer Wirkungsweise und des damit verbundenen biophysikalischen Prozesses des Energietransfer wurde verzichtet. Thematisiert wurde in diesem Zusammenhang nur die photochemische Reaktion, die zur Ladungstrennung im Reaktionszentrum des Fotosystems II führt und folglich den Ausgangspunkt der biochemischen Vorgänge darstellt. Die Darstellung der biochemischen Vorgänge ist aus Sicht des Komplexitätsniveaus auf gleicher Stufe mit derjenigen der Atmungskette in Studie 2 anzusiedeln. Mit der Präsentation der Komponenten der Thylakoidmembran und den hier ablaufenden Prozessen wurde ebenfalls in analoger Weise zu Studie 2 verfahren. Mit dieser Art der Darstellung wurde zwischen den Studien 2 und 3 eine Deckungsgleichheit angestrebt, die sich positiv auf das Wiedererkennen von bereits bekannten inhaltlichen Konzepten auswirken sollte. Insbesondere gilt dies für die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport am Cytochrom- b_6/f -Komplex, die zum Aufbau eines Protonengradienten führt und auf einem analogen Erklärungsmodell zum Elektronen- und Protonentransport am Komplex III der Atmungskette basiert, wie auch für die ATP-Synthese, die weitgehende Übereinstimmungen in ihrer modellhaften Interpretation für die beiden Organellen Mitochondrium und Chloroplast aufweist.

Mit der Darstellung der grundlegenden Prinzipien der Energietransformation an der Thylakoidmembran des Chloroplasten (d. h. lichtinduzierte Oxidation des Wassers und Bildung des Reduktionsäquivalents $\text{NADPH} + \text{H}^+$; Kopplung von Elektronen- und Protonentransport und Aufbau eines Protonengradienten; ferner Synthese von ATP) wurde den Forderungen des Lehrplans nachgekommen, einen Einblick in den biochemischen Ablauf der Primärreaktionen zu geben. Dabei wurden Transportprozesse, die bereits in den Studien 1 und 2 eingeführt worden waren, abermals aufgegriffen und in einem neuen Kontext vertieft. Ein neuer Aspekt liegt bei den Primärreaktionen der Fotosynthese in der prinzipiellen Umkehrbarkeit der biologischen Oxidation von $\text{NADH} + \text{H}^+$ unter Energiezufuhr in Form von Lichtenergie. Damit erfährt das Konzept der biologischen Membran durch die Thematisierung der Primärreaktionen der Fotosynthese eine Erweiterung.

3 MATERIAL UND METHODE

In diesem Abschnitt werden die Besonderheiten der in Studie 3 gestalteten Lernumgebungen näher erläutert. Weiterhin werden die deskriptiven Kennwerte der verwendeten Fragebögen hier vorgestellt.

3.1 Lernumgebungen der Studie 3

Das Thema „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ wurde in den Lernumgebungen basieren auf dem Abschnitt 1 behandelt, wobei auf viele Details des komplexen Vorgangs wie im vorangegangene Kapitel beschrieben nicht näher eingegangen werden konnte. Auch für die in dieser Studie gestalteten Lernumgebungen gilt, dass sie sich lediglich in der Darstellung der biologischen Inhalte, nicht aber in den vermittelten Inhalten selbst unterscheiden. Während die Struktur der Standbild- und der Animationsversion für diese Studie analog zu der in den entsprechenden Lernumgebungen der Studie 2 (Atmungskette) gestaltet ist, weichen die Simulationen zu den Primärreaktionen der Fotosynthese von denjenigen in Studie 2 (Atmungskette) ab. Die erste Simulation stellt eine weitere Variante dar, bei der der explorative Charakter und die Selbststeuerung des Lerners noch stärker im Vordergrund stand. Die zweite Simulation entspricht in ihrer Struktur der bei der Studie 2 (Atmungskette) eingesetzten Lernumgebung 3. Die dritte Simulation der Studie 3 (Fotosynthese) ist analog zu der ersten Simulation in dieser Studie strukturiert, enthält aber zusätzlich instruktionale Hilfestellungen inhaltlicher und struktureller Art. Zur besseren Orientierung wird der detaillierten Beschreibung der Lernumgebungen eine zusammenfassende Übersicht vorangestellt. Die hier bereits sichtbaren Unterschiede in den Lernumgebungen werden dann nachfolgend weiter konkretisiert.

3.1.1 Vergleichende Übersicht für die Lernumgebungen in der Studie 3

Lernumgebung	Standbild	Animation	Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2
Visualisierung der Lerninhalte	<ul style="list-style-type: none"> • Stehende Bilder 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen
Verbalisierung der Lerninhalte	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterungstexte zu bildlichen Darstellungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterungstexte zu bildlichen Darstellungen 	–	–	–
Weitere Elemente in der Lernumgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen zu den Lerninhalten
Struktur der Lernsequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • inhaltliche Sequenzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • inhaltliche Sequenzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertext 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertext mit linearen Abschnitten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypertext
Hilfe zur Strukturierung der Lernumgebung	–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgaben (fakultativ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lineare Abschnitte sind durch die Reihenfolge der gestellten Aufgaben festgelegt (obligatorisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgaben (fakultativ) • Strukturierung durch die Checkliste (guided tour, fakultativ)
Hilfen zur Bearbeitung der Aufgaben	–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Feedback bei richtiger und falscher Antwort 	<ul style="list-style-type: none"> • Feedback bei richtiger und falscher Antwort 	<ul style="list-style-type: none"> • Feedback bei richtiger und falscher Antwort • Explizite Hinweise auf auszuwählende Parameterkombinationen
Hilfen zur Bearbeitung der Lernkontrollfragen	–	–	–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Explizite Hinweise auf auszuwählende Parameterkombinationen • Bilder zur Erläuterung der Frage
Hilfe zu den fachlichen Inhalten in den animierten Darstellungen	–	–	–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterungstexte zu den nach Parameterauswahl animierten Prozessen

3.1.2 Lernumgebung 1 und Lernumgebung 2: Standbild und Animation

Standbild

Die Prozesse der Primärreaktionen werden hier durch stehende Bilder dargestellt. Teilchen- und Molekülbewegungen sind in den Abbildungen durch Bewegungsindikatoren (Pfeile) symbolisiert. Zu den Bildern können über dafür vorgesehene Buttons kurze Erklärungstexte abgerufen werden. Der Gesamtablauf der Primärreaktionen wird in fünf Abschnitte gliedert. Hinzu kommt ein einleitender Abschnitt und ein weiterer, der das zusätzliche Arbeitsmaterial enthält. Am Ende eines jeden Abschnitts wird eine Seite angezeigt, die eine Wiederholung der bisher bearbeiteten Sequenzen offeriert. Die Buttons auf dieser Seite ermöglichen den Sprung zum Anfang jedes bisher bearbeiteten Abschnitts, um eine zeitaufwendige Navigation durch Zurückblättern zu vermeiden. Als ergänzendes Arbeitsmaterial zur computergestützten Lernumgebung wurde eine Tischvorlage an den Arbeitsplätzen ausgelegt (s. IX 5.3). Diese enthielt eine schematische Darstellung des Chloroplasten und mit einem Ausschnitt aus der Thylakoidmembran.

Animation

Anstelle von stehenden Bildern werden in dieser Version animierte Darstellungen der Transportprozesse an der Thylakoidmembran gezeigt. Die Animationsversion ist ebenfalls in sieben Abschnitte gegliedert, die inhaltlich denen der Standbildversion entsprechen. Auch die Subsequenzierung eines Abschnitts erfolgte analog zur Standbildversion. Zu den animierten Darstellungen können entsprechend dieselben Lehrtexte wie in der Standbildversion abgerufen werden. Die Animationsversion wurde um dieselbe Tischvorlage ergänzt wie die Standbildversion.

Gemeinsame Gliederung der beiden Lernumgebungen

- Abschnitt 1: Einleitender Abschnitt zu den Fotosynthesereaktionen

In diesem Abschnitt werden kurze Erläuterungen zum Aufbau des Chloroplasten und zu seiner Arbeitsteilung bezüglich der Fotosynthesereaktionen in Primär- und Sekundärreaktionen gegeben. Weiterhin wird die Thylakoidmembran mit ihren für die Primärreaktionen relevanten Komponenten vorgestellt. Der Abschnitt enthält drei Multiple-Choice-Quizfragen zu den Ausgangs- und Endstoffen der Fotosynthesereaktionen.

- Abschnitt 2: Reaktionen am Fotosystem II

Hier werden die wiederholte Anregung des Fotosystems durch Sonnenlicht und die Wasserspaltung gezeigt. Dieser Abschnitt enthält drei Lernkontrollfragen mit Speicherfunktion.

- Abschnitt 3: Elektronen- und Protonentransport am Cytochrom- b_6/f -Komplex

Dieser Abschnitt enthält eine Lernkontrollfrage.

- Abschnitt 4: Reaktionen am Fotosystem I

Im Abschnitt 4 werden die erste und zweite Lichtenregung des Fotosystems I mit abschließender Bildung von $\text{NADPH} + \text{H}^+$ gezeigt. Der Abschnitt enthält zwei Lernkontrollfragen.

- Abschnitt 5: Bildung eines zweiten Reduktionsäquivalents $\text{NADPH} + \text{H}^+$

Hier wird ein kompletter Durchlauf der Primärreaktionen dargestellt. Der Abschnitt endet mit einer abschließenden Lernkontrollfrage.

- Abschnitt 6: ATP-Synthese

Mit drei Lernkontrollfragen.

- Abschnitt 7: Zusatzmaterial

Das „Zusatzmaterial“ thematisiert den zyklischen Elektronentransport ausgehend vom Ferredoxin. Es enthält eine Lernkontrollfrage.

Beispiel: Abschnitt 5 in der Standbildversion

Bei der Spaltung von 2 Wassermolekülen wurden am Fotosystem II 4 Elektronen abgegeben. 2 von diesen Elektronen wurden über die photosynthetische Elektronentransportkette auf ein NADP⁺ übertragen.

Die folgende Abbildung zeigt Ihnen nochmals den gesamten Ablauf für die 2 Elektronen, die sich jetzt noch am Fotosystem II befinden.

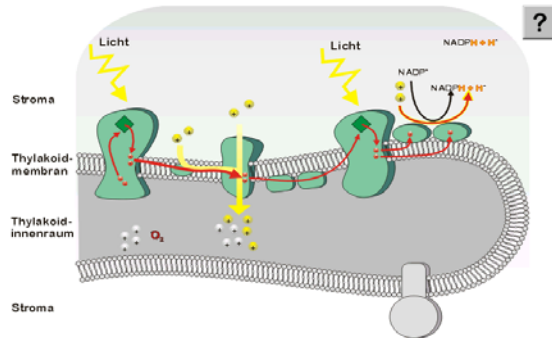


Abbildung VII-1: Einleitender Text

Abbildung VII-2: Bildung eines zweiten Reduktionsäquivalents; stehendes Bild mit Bewegungsindikatoren

Ein weiteres NADPH+H⁺ wird gebildet
 Am Wasserspaltungsapparat wurden 2 Wassermoleküle in 4 Elektronen, 4 Protonen und 1 Molekül Sauerstoff zerlegt. Die Protonen und der Sauerstoff wurden in das Thylakoidlumen abgegeben. Die zwei übrigen Elektronen durchlaufen jetzt die Elektronentransportkette und bilden im Stroma mit NADP⁺ und zwei Protonen ein weiteres NADPH+H⁺.
 Dabei werden am Cytochrom-Komplex 4 weitere Protonen (2 vom Plastocyanin und 2 aus dem Stroma) in das Thylakoidlumen befördert. Dies führt zum Aufbau eines Konzentrationsgradienten für Protonen, der wie bei der Atmungskette zur ATP-Synthese genutzt wird.



Abbildung VII-3: Erläuterungstext zur obigen Abbildung, der über den ?-Button abgerufen werden kann

Beispiel: Abschnitt 5 in der Animationsversion

Bei der Spaltung von 2 Wassermolekülen wurden am Fotosystem II 4 Elektronen abgegeben. 2 von diesen Elektronen wurden über die photosynthetische Elektronentransportkette auf ein NADP^+ übertragen.

Die folgende Abbildung zeigt Ihnen nochmals den gesamten Ablauf für die 2 Elektronen, die sich jetzt noch am Fotosystem II befinden.



Abbildung VII-4: Einleitender Text

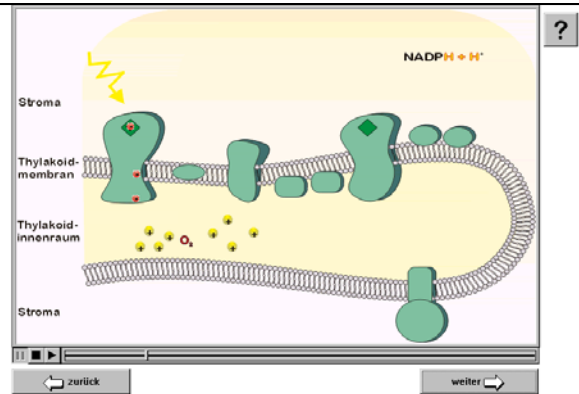


Abbildung VII-5: 1. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents

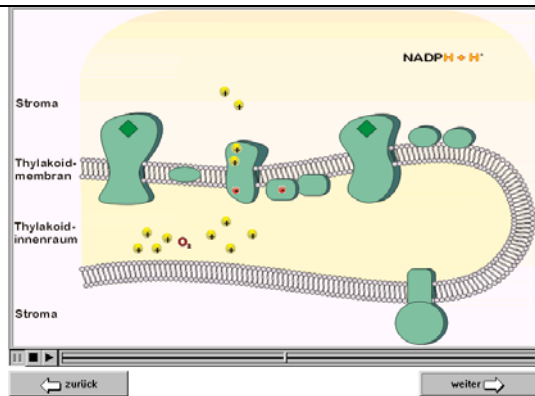


Abbildung VII-6: 2. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents

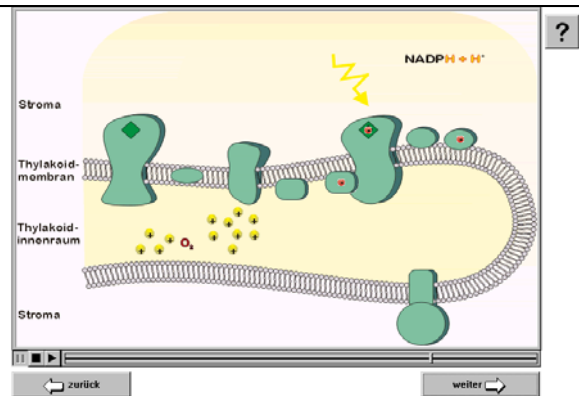


Abbildung VII-7: 3. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents

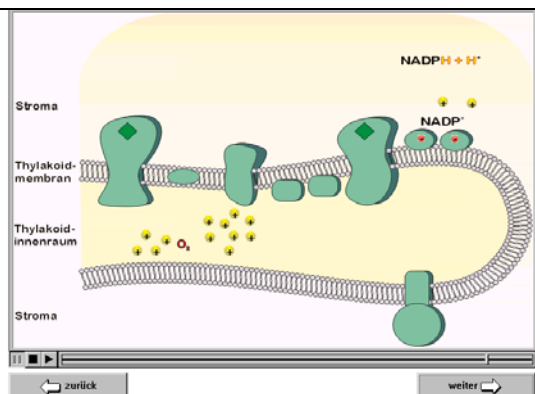


Abbildung VII-8: 4. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents

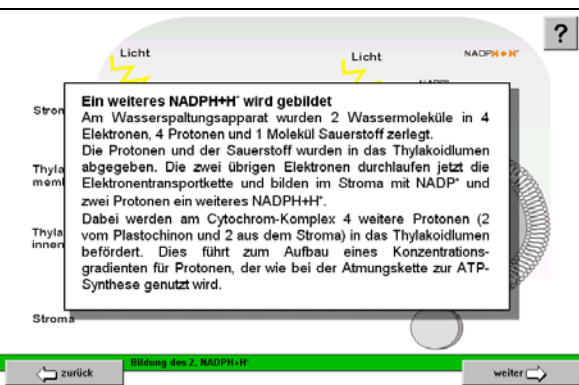


Abbildung VII-9: Erläuterungstext zur Animation

3.1.3 Lernumgebung 3:

Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen

Diese Form der Simulation kam erstmalig bei der Studie 3 zum Einsatz. In dieser Version wurden instruktionale Hilfestellungen auf ein Minimum reduziert. Sie bestehen lediglich aus Aufgaben und Lernkontrollfragen, die sich als Angebot an die Versuchspersonen richteten. Welche dieser Aufgaben bearbeitet wurden und in welcher Reihenfolge, blieb den Versuchspersonen selbst überlassen. Abweichend von den Simulationen in der zweiten Studie entfällt dadurch eine Sequenzierung der Lerninhalte durch Aufgaben, die eine Reihenfolge vorgeben. Damit besteht die erste Simulation der Studie 3 aus folgenden Abschnitten:

Gliederung der Lernumgebung 3

- Abschnitt 1: Einleitung

Dieser Abschnitt ist identisch mit dem einleitenden Abschnitt aus Standbild- und Animationsversion.

- Abschnitt 2: Simulation zu den Primärreaktionen der Fotosynthese

Mit optional zu bearbeitenden Aufgaben und Lernkontrollfragen.

- Abschnitt 3: Zusatzmaterial

Das Zusatzmaterial ist identisch mit demjenigen aus Standbild- und Animationsversion.

Erläuterungen zur Simulation (Abschnitt 2)



Abbildung VII-10: Auswahlseite zur Simulation „Primärreaktionen der Fotosynthese“ (Erläuterungen im Text)

Die Auswahlseite zur Simulation umfasst die vier Rubriken „Info“, „Simulation“, „Aufgaben“ und „Lernkontrolle“ (s. Abbildung VII-10). Im Feld „Info“ kann jeweils einer der Simulationsparameter „Licht“, „Wasser“, „NADP+“ oder „ADP“ ausgewählt werden. Der Benutzer erhält

dann eine kurze Information zu dem ausgewählten Parameter in Form einer animierten Darstellung mit einem ergänzenden Erläuterungstext (s. Abbildung VII-11 und Abbildung VII-12).

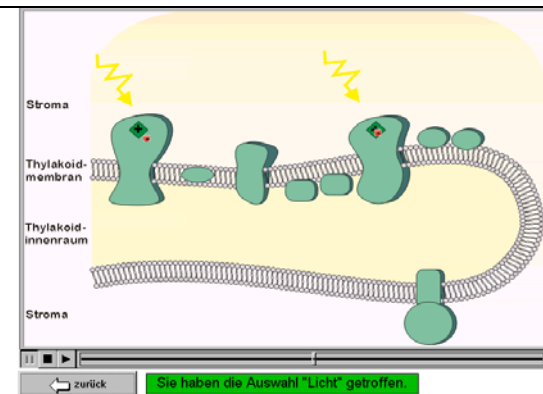


Abbildung VII-11: Animation zum Parameter „Licht“ in der Rubrik „Info“

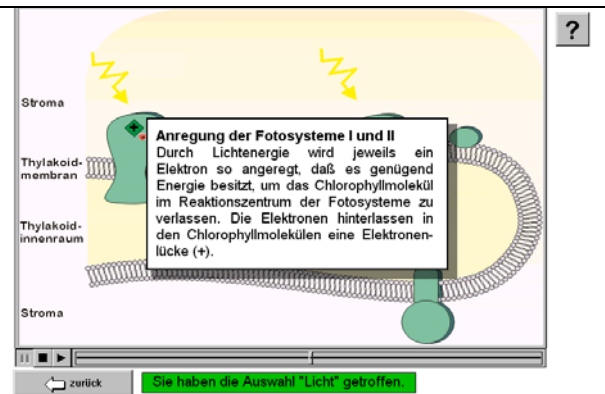


Abbildung VII-12: Erläuterungstext zur obigen Animation, der über den ?-Button abrufbar ist.

In der Rubrik „Simulation“ auf der Auswahlseite sind alle Parameter beliebig miteinander kombinierbar. Abzüglich der Einfachauswahlen, die im Feld „Info“ separat behandelt wurden, bleiben für die vier Parameter insgesamt elf Kombinationsmöglichkeiten, da es nicht auf die Reihenfolge der Parameterwahl ankommt. Es ergeben sich sechs Zweifachauswahlen, vier Dreifachauswahlen und eine Vierfachauswahl (s. Abbildung VII-13). Eine der Zweifachauswahlen, die Parameterkombination „Licht“ und „ADP“ kann erst im Zusatzmaterial gewählt werden. Dies sind die physiologischen Voraussetzungen für den zyklischen Elektronentransport. Dieser setzt ein, wenn ein hoher Reduktionsgrad für NADP^+ erreicht ist, d. h. es liegt ausschließlich $\text{NADPH} + \text{H}^+$ vor. Um sich den zyklischen Elektronentransport zu erarbeiten, sollte dem Benutzer jedoch zunächst bewusst sein, wie es zu Bildung von $\text{NADPH} + \text{H}^+$ durch den nicht-zyklischen Elektronentransport kommt. Dazu stehen dem Benutzer zehn Parameterkombinationen zur Verfügung, mit deren Auswahl er sich die Vorgänge an der Thylakoidmembran erschließen kann.

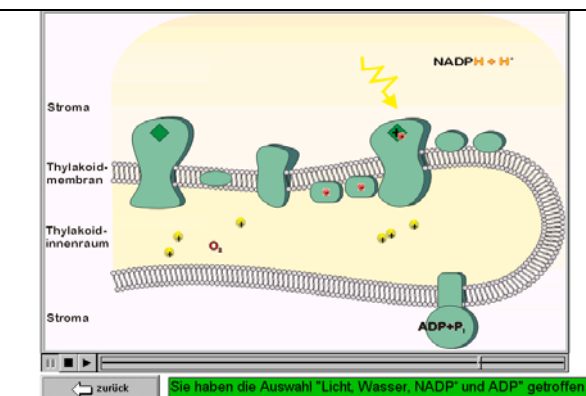


Abbildung VII-13: Animierte Darstellung zur Parameterkombination „Licht“, „Wasser“, „NADP⁺“ und „ADP“
Über den „Zurück“-Button gelangt man zurück zur Auswahlseite.

Um das Lernmaterial für den Benutzer inhaltlich zu strukturieren, ist die dritte Rubrik „Aufgaben“ vorgesehen. Mit Hilfe der Aufgaben soll der Benutzer auf die wesentlichen Aspekte des komplexen Vorgangs aufmerksam gemacht werden (Prechtl & Nerdel, 2002).

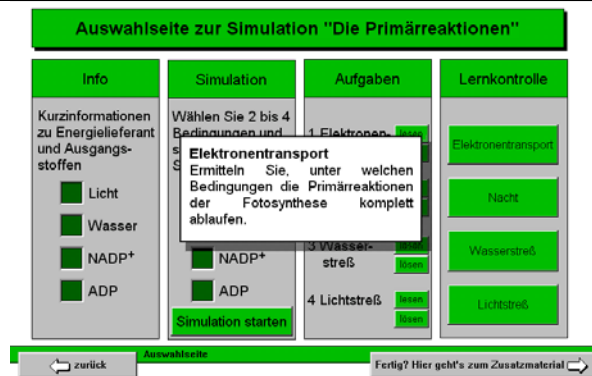


Abbildung VII-14: Aufgabe 1 „Elektronentransport“ zur Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“

Der Text wird bei Anklicken des Buttons „lesen“ in der Rubrik „Aufgaben“ eingeblendet.

Zur Lösung der Aufgabe sind verschiedene Antwortformate (s. IX 4.1.3) vorgesehen. In jedem Fall erhält der Benutzer aber ein Feedback, der explizite oder implizite Hinweise auf eine richtige Lösung der Aufgabe enthält, falls diese falsch beantwortet worden ist.

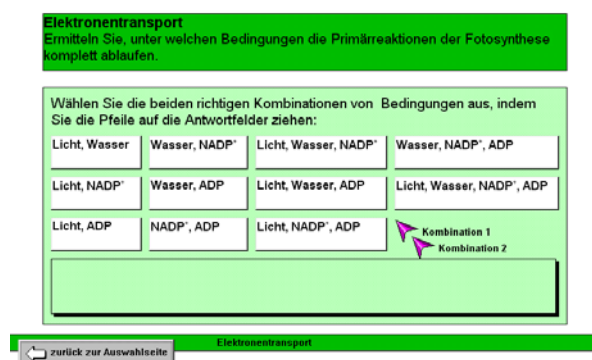


Abbildung VII-15: Antwortseite zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“
Die Antwortseite wird bei Anklicken des Buttons „lösen“ in der Rubrik „Aufgaben“ eingeblendet.

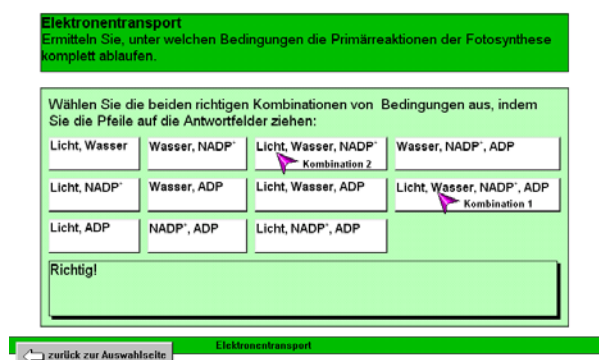


Abbildung VII-16: Feedback zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ bei richtiger Antwort

Des Weiteren hat der Benutzer die Möglichkeit, seine themenspezifischen Kenntnisse anhand von wiederholenden oder weiterführenden Lernkontrollfragen zu überprüfen und zu vertiefen.

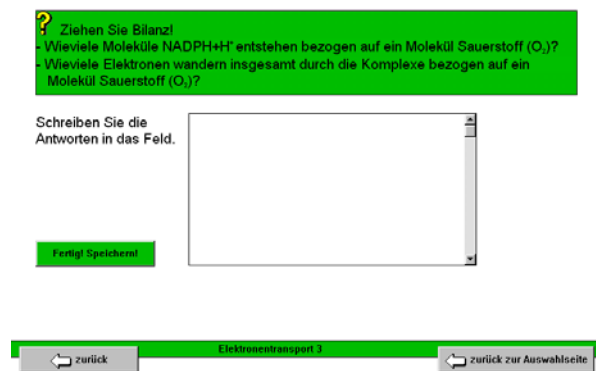


Abbildung VII-17: Beispiel für eine weiterführende Lernkontrollfrage zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“. Die eingegebene Antwort kann über den grünen Button „Fertig! Speichern!“ gespeichert werden.

3.1.4 Lernumgebung 4: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1

Die Lernumgebung 4 dieser Studie ist in ihrem Aufbau analog zu der Lernumgebung 3 aus der Studie 2 (Atmungskette) strukturiert. Diese Simulation wird durch nacheinander zu bearbeitende Aufgaben gegliedert. Die Aufgabenstellungen mit ihren Antwortseiten und zugehörigen Lernkontrollfragen unterscheiden sich nicht von denen in der Lernumgebung 3 verwendeten. Lediglich die Reihenfolge der Bearbeitung ist hier vorgegeben.

Gliederung der Lernumgebung 4

- Abschnitt 1: Einleitung

Einleitender Abschnitt wie in den Lernumgebungen 1-3.

- Abschnitt 2: Informationen zu den Simulationsparametern
„Licht“, „Wasser“, „NADP⁺“ und „ADP“

Die Informationen sind identisch mit denen in der Lernumgebung 3 (s. Abbildung VII-12 und Abbildung VII-18).

- Abschnitt 3: Vier Aufgaben zur Bearbeitung der Simulation
mit Antwortseiten und Lernkontrollfragen

Die Aufgaben sind in der Reihenfolge gestellt, wie sie auf der Auswahlseite der Lernumgebung 3 aufgelistet sind. Die Lernkontrollfragen zu einer Aufgabe werden im Anschluss an die Antwortseite einer Aufgabe appliziert (s. Abbildung VII-19 bis Abbildung VII-21).

- Abschnitt 4: Zusatzmaterial

Erläuterungen zu den Abschnitten 2 und 3

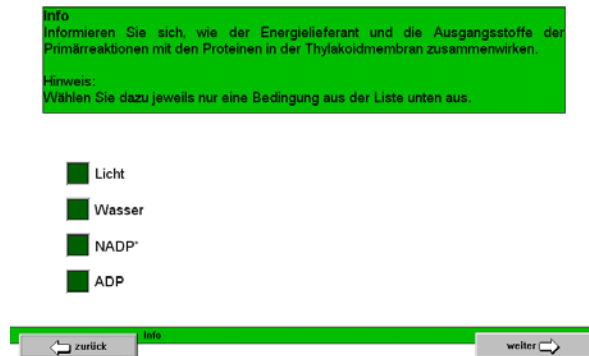


Abbildung VII-18: Infoseite der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“

Bei Anklicken eines Simulationsparameters wird eine kurze animierte Darstellung mit Erläuterungstext gezeigt (s. Abbildung VII-11 und Abbildung VII-12).

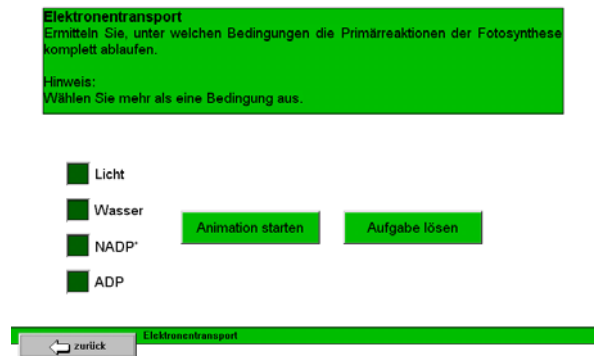


Abbildung VII-19: Erste Aufgabe „Elektronentransport“ zur Bearbeitung der Simulation

Der Benutzer hat die Möglichkeit, die Aufgabe mit der Simulation zu bearbeiten oder die Aufgabe zu lösen.

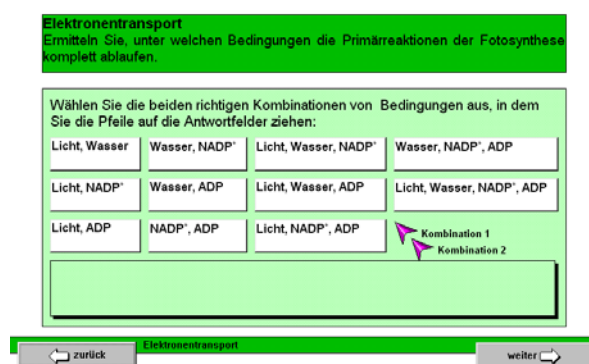


Abbildung VII-20: Antwortseite zur Aufgabe „Elektronentransport“

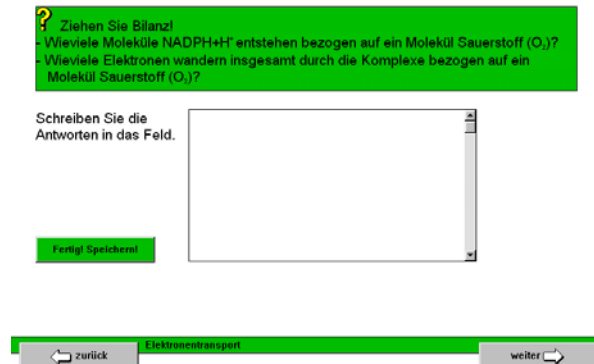


Abbildung VII-21: Weiterführende Lernkontrollfrage zur Aufgabe „Elektronentransport“

3.1.5 Lernumgebung 5: Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2

Die Lernumgebung 5 basiert auf der Lernumgebung 3 dieser Studie (Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen bestehend aus optional zu bearbeitenden Aufgaben und Lernkontrollfragen). Neben den schon integrierten Aufgaben und Lernkontrollfragen wurden aber weitere Hilfen in diese Lernumgebung eingebaut. Diese instruktionalen Hilfestellungen können wieder in strategische und inhaltliche Hilfen unterteilt werden (s. auch VI 3.1.5).

Gliederung der Lernumgebung 5

- Abschnitt 1: Einleitung

Einleitender Abschnitt identisch zum demjenigen in den Lernumgebung 1 bis Lernumgebung 4 in dieser Studie.

- Abschnitt 2: Simulation zu den Primärreaktionen der Fotosynthese

Mit optional zu bearbeitenden Aufgaben, Lernkontrollfragen und instruktionalen Hilfestellungen.

- Abschnitt 3: Zusatzmaterial

(s. Lernumgebung 1 bis Lernumgebung 4 in dieser Studie)

Erläuterungen zum Abschnitt 2

Die strategischen Hilfen beziehen sich auf das strukturierte Arbeiten mit der Simulation. Die Versuchspersonen erhalten eine Anleitung, wie mit der Lernumgebung sinnvollerweise gearbeitet wird, bevor sie die Auswahlseite der Simulation im Programm erreichen (s. Abbildung VII-22). Des Weiteren ist auf der Auswahlseite eine Checkliste abrufbar, die die Kontrolle über den Fortschritt der Bearbeitung ermöglicht. In der Checkliste sind darüber hinaus implizit inhaltliche Hinweise enthalten, welche Auswahl von Parameterkombinationen für die Lösung einer bestimmten Aufgabe sinnvoll ist (s. Abbildung VII-23 bis Abbildung VII-25).

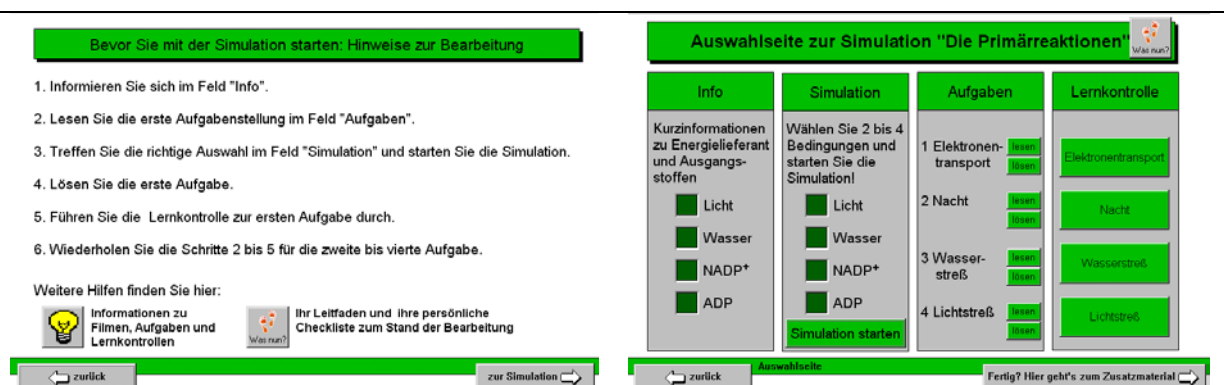


Abbildung VII-22: Anleitung zur Bearbeitung der Simulation

Abbildung VII-23: Auswahlseite zur Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“

Ihre Gestaltung entspricht derjenigen in Lernumgebung 3. Zusätzlich kann über den „Was nun?“-Button eine Checkliste aufgerufen werden.

Checkliste 1 von 2

Hier können Sie abhaken, welche Teile der Simulation Sie bereits bearbeitet haben

Info

Licht Wasser NADP ADP

1 Elektronentransport

Aufgabe	Simulation Auswahl	Aufgabe	Lernkontrolle
<input type="checkbox"/> lesen	<input type="checkbox"/> Licht, Wasser, NADP, ADP <input type="checkbox"/> Licht, Wasser, NADP	<input type="checkbox"/> lösen	<input type="checkbox"/> Elektronentransport 1 <input type="checkbox"/> Elektronentransport 2 <input type="checkbox"/> Elektronentransport 3

2 Nacht

Aufgabe	Simulation Auswahl	Aufgabe	Lernkontrolle
<input type="checkbox"/> lesen	<input type="checkbox"/> Wasser, NADP, ADP <input type="checkbox"/> Wasser, NADP <input type="checkbox"/> Wasser, ADP <input type="checkbox"/> NADP, ADP	<input type="checkbox"/> lösen	<input type="checkbox"/> Nacht

[← zurück zur Auswahlseite](#)

[weiter zur Checkliste 2 →](#)

Abbildung VII-24: Erster Teil der Checkliste zur Simulation „Die Primärreaktionen“

Die Kontrollfelder können durch Anklicken markiert werden. So erhält der Benutzer einen Überblick über seinen aktuellen Bearbeitungsstand. Enthält implizite inhaltliche Hilfen.

Checkliste 2 von 2

Hier können Sie abhaken, welche Teile der Simulation Sie bereits bearbeitet haben

3 Wasserstreß

Aufgabe	Simulation Auswahl	Aufgabe	Lernkontrolle
<input type="checkbox"/> lesen	<input type="checkbox"/> Licht, NADP, ADP <input type="checkbox"/> Licht, NADP	<input type="checkbox"/> lösen	<input type="checkbox"/> Wasserstreß

4 Lichtstreß

Aufgabe	Simulation Auswahl	Aufgabe	Lernkontrolle
<input type="checkbox"/> lesen	<input type="checkbox"/> Licht, Wasser, ADP <input type="checkbox"/> Licht, Wasser	<input type="checkbox"/> lösen	<input type="checkbox"/> Lichtstreß 1 <input type="checkbox"/> Lichtstreß 2

[← zurück zur Checkliste 1](#)

[zurück zur Auswahlseite](#)

Abbildung VII-25: Zweiter Teil der Checkliste zur Simulation „Die Primärreaktionen“

Weitere inhaltliche Hilfestellungen erhält der Benutzer durch Erläuterungstexte zu den dargestellten Animationen, den Aufgabenstellungen und Lernkontrollfragen über dafür vorgesehene Buttons (s. Abbildung VII-26 bis Abbildung VII-28).

Die Primärreaktionen der Fotosynthese

Fotosystem II wird durch Lichtenergie angeregt und überträgt ein Elektron auf einen Akzeptor.

Am Wasserspaltungsapparat werden 2 Wassermoleküle in 4 Elektronen, 4 Protonen und 1 Molekül Sauerstoff zerlegt. Die Protonen und der Sauerstoff werden in das Thylakoidlumen abgegeben. Ein Elektron füllt die Elektronenlücke (+) im Chlorophyllmolekül auf. Der Prozeß wiederholt sich.

Zwei Elektronen werden über eine Elektronentransportkette zum Fotosystem I gebracht, wo sie eine Elektronenlücke (+) im Chlorophyllmolekül schließen, die ein energiereiches Elektron hinterlassen hat. Fotosystem I überträgt Elektronen auf Ferredoxin. Von hier werden jeweils 2 Elektronen auf NADP⁺ übertragen. Unter Aufnahme von zwei Protonen aus dem Stroma entsteht NADPHH⁺.

Während des Elektronentransports werden am Cytochrom-Komplex 4 Protonen (2 vom Plastochinon und 2 aus dem Stroma) in das Thylakoidlumen befördert. Dies führt zum Aufbau eines Protonengradienten. Die Energie des Protonengradienten wird bei Anwesenheit von ADP zur ATP-Synthese genutzt.

[← zurück](#) Sie haben die Auswahl „Licht, Wasser, NADP⁺ und ADP“ getroffen

Abbildung VII-26: Erläuterungstext zur animierten Darstellung bei Auswahl der Parameterkombination „Licht“, „Wasser“, „NADP⁺“ und „ADP“

Elektronentransport

Ermitteln Sie, unter welchen Bedingungen die Primärreaktionen der Fotosynthese komplett ablaufen.

Wählen Sie die Bedingungen aus, in dem Sie die Pfeile auf:

Licht, Wasser

Licht, NADP⁺

Licht, ADP

oder

Licht, Wasser und NADP⁺ oder Licht, Wasser, NADP⁺ und ADP

Falsche Antwort gewählt?

Vielleicht haben Sie in der Simulation nicht die richtige Auswahl getroffen. Gehen Sie zurück zur Auswahlseite und wählen Sie folgende Bedingungen aus:

Licht, Wasser und NADP⁺ oder Licht, Wasser, NADP⁺ und ADP

Leider falsch! Gehen Sie zurück zur Auswahlseite. Wählen Sie die Bedingungen für den kompletten Ablauf der Primärreaktionen.

[← zurück zur Auswahlseite](#)

Elektronentransport

Abbildung VII-27: Hilfe zu einer falsch beantworteten Aufgabe

Hier werden die Parameterkombinationen, die zur richtigen Lösung der Aufgabe führen, explizit aufgelistet.

Ziehen Sie Bilanz
 - Wieviele Moleküle NADPH+H⁺ entstehen bezogen auf ein Molekül Sauerstoff (O₂)?
 - Wieviele Elektronen wandern insgesamt durch die Komplexe bezogen auf ein Molekül Sauerstoff (O₂)?

Schreiben Sie die Antwort in das Feld.

Schwierigkeiten. die Frage zu beantworten?
 Gehen Sie zurück zur Auswahlseite und wählen Sie im Feld "Simulation" die Bedingungen
 Licht, Wasser und NADP⁺

Fertig Speichern

← zurück Elektronentransport 3 zurück zur Auswahlseite

Abbildung VII-28: Unterstützung zu einer Lernkontrollfrage

Hier wird eine Parameterkombination genannt, bei der die resultierende animierte Darstellung die Lösung der Frage implizit enthält.

3.2 Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen

An dieser Studie waren insgesamt 150 Schülerinnen und Schüler der teilnehmenden Kurse aus den Gymnasien und Gesamtschulen beteiligt. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer waren gleichmäßig auf die fünf Experimentalgruppen der Studie 3 verteilt (zur Randomisierung s. IV 3.2). Daraus resultierte eine Besetzung von ungefähr 30 Personen je Experimentalgruppe (s. Tabelle VII-1).

Tabelle VII-1: Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen in Studie 3 (Fotosynthese)

Lernumgebung	Experimentalgruppe	N
1	Standbild	30
2	Animation	30
3	Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	33
4	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1	30
5	Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2	27
Summe:		150

3.3 Die Erhebungsinstrumente

Im Folgenden werden die Besonderheiten der in dieser Studie verwendeten Fragebögen und ihre deskriptiven Kennwerte vorgestellt. Die vollständigen Fragebögen sind im Anhang (s. IX 6) abgedruckt.

3.3.1 Vortest

Tabelle VII-2 fasst die Reliabilitäten und die deskriptiven Statistiken für den Vortest der Studie 3 zusammen. Demnach erreichen die Skalen zur Erfassung der individuellen Lernermerkmale zufriedenstellende bis gute Reliabilitäten mit Ausnahme der Skalen für die Lesekompetenz. Das themenspezifische Wissen wurde im Vortest mit sieben Items zum Faktenwissen (Items 1-7) und acht Items zum Verständnis (Items 8-15) erhoben. Diese Fachkenntnisse wurden in dieser Studie durch Items im Single-Choice-Format erfasst. Zu einem Choice-Item wurden jeweils vier Antworten vorgegeben, von denen eine richtige Antwort auszuwählen war. Die Reliabilität des themenspezifischen Wissens im Vortest liegt mit Cronbachs Alpha = 0,45 unterhalb des befriedigenden Bereichs.

Tabelle VII-2: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Vortests in Studie 3

Variable	Skala	N	M	SD	Cronbachs Alpha
Computerkenntnisse	Computerinteresse	4	5,86	2,97	0,85
	Computerwissen	4	4,28	3,10	0,80
verbale Lernpräferenz	guter sprachlicher Ausdruck	4	7,88	2,59	0,82
	Lesekompetenz	2	4,33	1,43	0,62
visuelle Lernpräferenz	gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen	4	6,21	2,90	0,91
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	15	5,14	2,35	0,45

3.3.2 Nachtest

Der Tabelle VII-3 sind die deskriptiven Statistiken und Reliabilitäten für den Nachtest der Studie 3 zu entnehmen. Hier erreichten die Reliabilitäten für die kognitive Belastung und das Interesse als gut einzustufende Werte, während Cronbachs Alpha für die Aufmerksamkeit deutlich geringer ausfällt. Das themenspezifische Wissen wurde im Nachtest anhand derselben sieben Items für das Faktenwissen und der acht Items für das Verständnis wie im Vortest (s.o.) überprüft. Allerdings ist die Reliabilität des Wissenstests wie im Vortest mit Cronbachs Alpha = 0,52 nicht sonderlich hoch.

Tabelle VII-3: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Nachtests in Studie 3

Variable	Skala	N	M	SD	Cronbachs Alpha
	Kognitive Belastung	8	15,34	5,87	0,89
	Aufmerksamkeit	2	3,95	1,96	0,65
	Interesse	5	7,36	4,61	0,89
themenspezifisches Wissen	Faktenwissen / Verständnis	15	7,69	2,50	0,52

3.3.3 Diskussion der Kennwerte der Erhebungsinstrumente

Die geringen Reliabilitäten der beiden Wissenstests fallen bei dieser Untersuchung nur wenig ins Gewicht, da hier ohnehin die grundsätzlichen Probleme der Veränderungsmessung bestehen. Für Veränderungsmessungen gilt, dass selbst bei großen Reliabilitäten der Einzelmessungen und einer großen Korrelation zwischen den beiden Skalen, die Reliabilität des Differenzmaßes nur ein Bruchteil der beiden ursprünglichen Reliabilitäten (Rost, 1996) beträgt. In dieser Studie wurde als abhängige Variable das Differenzmaß aus den beiden Skalen des Nach- und des Vortest zur Messung des Lernerfolgs bezogen auf die Kategorien Faktenwissen und Verständnis verwendet (s. IV 4.1.2). Von daher sind die Reliabilitäten der entsprechenden zwei Einzelskalen bedingt aussagekräftig und nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

4 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie 3 vorgestellt. Die Gliederung des Kapitels mit seinen Abschnitten erfolgt analog zum Ergebnisteil der Studie 2. Im Abschnitt 4.1 werden die Daten deskriptiv dargelegt. Der Abschnitt 4.2 ist den Ergebnissen der Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen gewidmet. Der Abschnitt 4.3 stellt die Ergebnisse der Datenanalyse mit probabilistischen Testmodellen dar. Im Abschnitt 4.4 werden die Forschungshypothesen wiederholt überprüft, wobei die Treatmentvergleiche hier auf der Basis eines latenten Klassenmodells vorgenommen wurden. Der Abschnitt 4.5 bietet eine vergleichende Übersicht über die Ergebnisse der Studie 2.

4.1 Deskriptive Statistik

4.1.1 Häufigkeiten der Summenscores in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis

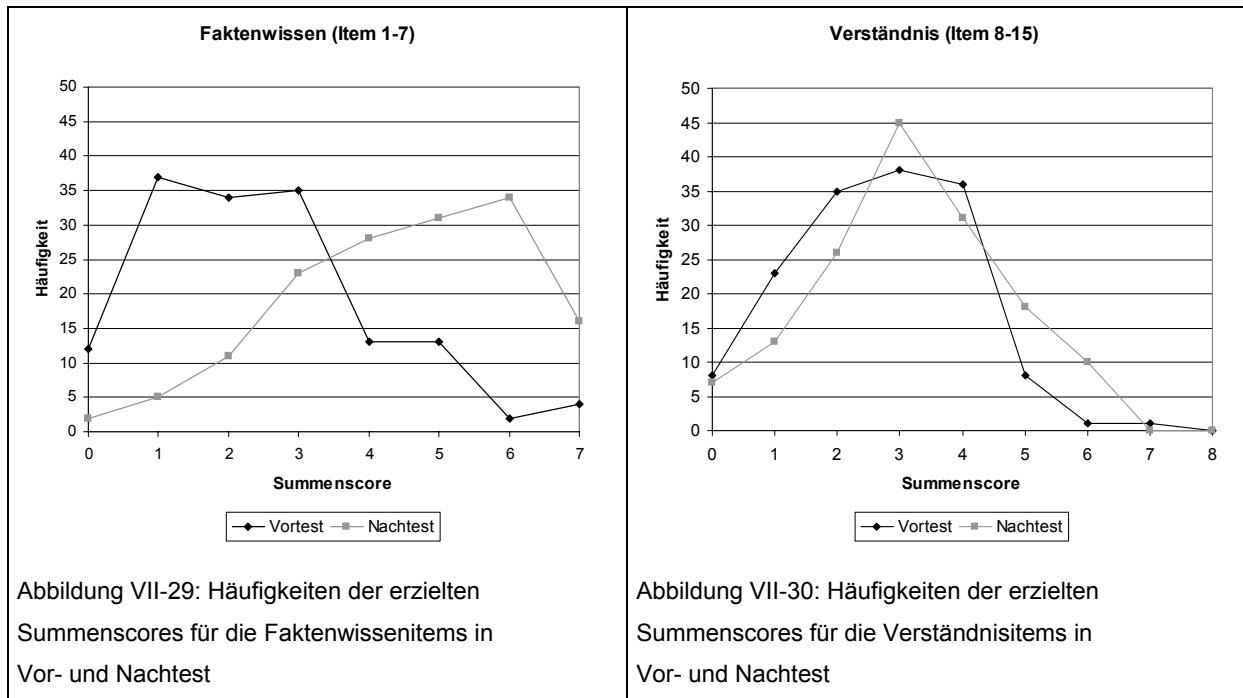
Zu allen Items in Vor- und Nachtest waren jeweils vier Antworten vorgegeben, von denen eine richtig war (s. IX 6.9). Für die richtige Beantwortung eines Items wurde ein Punkt gegeben. In der Kategorie Faktenwissen (Items 1-7, s. IX 6.9) konnten damit maximal jeweils 7 Punkte in Vor- und Nachtest erreicht werden. Die Kategorie Verständnis wurde mit 8 Items im Vor- und Nachtest (Items 8-15, s. IX 6.9) überprüft. Der maximal zu erreichende Summenscore beträgt damit 8 Punkte.

Beim Faktenwissen im Vortest werden von 79% der Versuchspersonen Summenscores zwischen 0 und 3 Punkten erzielt. Die maximalen Personenhäufigkeiten treten damit am unteren Rand der Spannweite auf (s. Tabelle VII-4). Die Faktenwissenitems waren damit für die gesamte Stichprobe im Vortest eher zu schwierig, zumal bei diesen Single-Choice-Antwortformaten eine Wahrscheinlichkeit von 25% bestand, eine richtige Antwort zu erraten. Im Nachtest werden bei den Faktenwissenitems dagegen von über 72% Summenscores zwischen 4 und 7 Punkten erreicht. Das Schwierigkeitsniveau der Faktenwissenitems war jedoch auch im Nachtest noch hinreichend groß, so dass nicht alle Versuchspersonen Summenscores in der oberen Hälfte der Spannweite erzielen konnten. Insgesamt konnte die Stichprobe jedoch ihr Faktenwissen erheblich verbessern (s. Abbildung VII-29).

Die Häufigkeitsverteilungen für die Summenscores der Verständnisitems in Vor- und Nachtest sind dagegen von völlig anderer Gestalt. Die Kurven sind beinahe deckungsgleich. Die Verteilungskurve des Nachtests nimmt einen geringfügig steileren Verlauf als diejenige des Vortests. Während im Vortest 69% der Stichprobe zwischen 0 und 3 Punkten erzielen, verringert sich dieser Prozentsatz im Nachtest auf 60%. 31% der Stichprobe erreichen damit 4 bis 7 Punkte im Vortest während sich dieser Anteil, der diese Summenscores im Nachtest erzielt, auf nur 40% erhöht. Daran wird deutlich, dass die Verständnisitems im Vortest, aber überraschenderweise auch im Nachtest, zu schwer waren, als das die Stichprobe deutliche Lernzuwächse in dieser Kategorie hätte verzeichnen können. Tabelle VII-4 und Abbildung VII-30 zeigen die Ergebnisse im Detail.

Tabelle VII-4: Häufigkeiten der erzielten Summenscores differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Faktenwissen (Item 1-7)			Verständnis (Item 8-15)		
Summenscore	Häufigkeit Vortest [N]	Häufigkeit Nachtest [N]	Summenscore	Häufigkeit Vortest [N]	Häufigkeit Nachtest [N]
0	12	2	0	8	7
1	37	5	1	23	13
2	34	11	2	35	26
3	35	23	3	38	45
4	13	28	4	36	31
5	13	31	5	8	18
6	2	34	6	1	10
7	4	16	7	1	0
			8	0	0



4.1.2 Häufigkeiten der Zuwächse für das Faktenwissen und das Verständnis

Als Maß für den Lernerfolg in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis werden auch in dieser Studie die Lernzuwächse betrachtet. Die Lernzuwächse in den Kategorien sind die Differenzen der Summenscores aus Nach- und Vortest (s. IV 4.1.2). Ein negativer Lernerfolg ergibt sich somit, wenn im Nachtest ein schlechteres Ergebnis erzielt wurde als im Vortest. Abbildung VII-31 zeigt die Personenhäufigkeiten in Abhängigkeit der erreichten Zuwächse. Daran wird eine unterschiedliche Streuung der Zuwächse in den beiden Kategorien sichtbar: die Häufigkeitsverteilung für *Zuwachs Faktenwissen* verläuft deutlich steiler als diejenige des Zuwachses *Verständnis*. Ferner befindet sich die Kurve der Häufigkeitsverteilung für den *Zuwachs Faktenwissen* rechts von dem des *Zuwachs Verständnis*.

Entsprechend erreichen nur ca. 15% der Stichprobe beim Faktenwissen keinen Zuwachs oder erzielen im Nachtest gar schlechtere Ergebnisse als im Vortest. 65% der Stichprobe können ihr Faktenwissen um 1 bis 3 Punkte verbessern. Die restlichen 20% erreichen Zuwächse von 4 bis 6 Punkten. Die Zuwächse beim Verständnis fallen deutlich geringer aus. Die Stichprobe ist hier etwa zweigeteilt: 51% können ihr Ergebnis im Nachtest gegenüber dem Vortest nicht verbessern, d. h. diese Versuchspersonen weisen Zuwächse im Verständnis auf, die kleiner oder gleich 0 sind. Komplementär erreichen 49% der Stichprobe Zuwächse im Verständnis zwischen 1 und 5 Punkten.

Tabelle VII-5: Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis

Score	Zuwachs	
	Faktenwissen [N]	Verständnis [N]
-4	0	2
-3	2	6
-2	0	15
-1	6	21
0	14	32

Score	Zuwachs	
	Faktenwissen [N]	Verständnis [N]
1	38	28
2	30	25
3	30	16
4	17	4
5	10	1
6	3	0

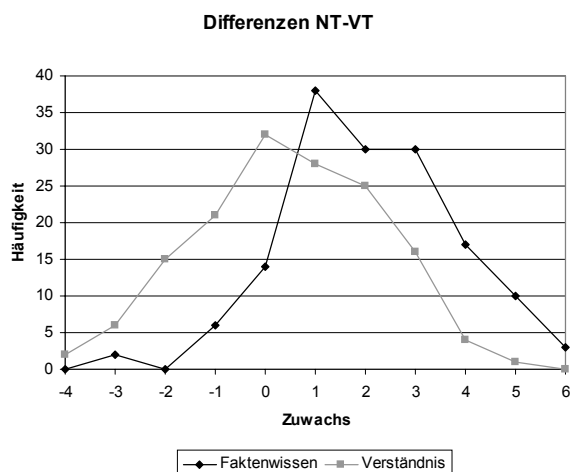


Abbildung VII-31: Häufigkeiten der errechneten Differenzen (Zuwächse) aus Nachtest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis

4.1.3 Deskriptive Statistiken für die Vor- und Nachtestergebnisse und ihre Differenzwerte

Die Versuchspersonen erreichen beim *Zuwachs Faktenwissen* durchschnittlich 2,08 Punkte wogegen der *Zuwachs Verständnis* nur 0,47 Punkte im Mittel beträgt. Im Faktenwissen des Vortests wird von den Versuchspersonen ein Mittelwert von 2,45 Punkten erzielt, der sich im Nachtest auf einen Mittelwert von 4,53 Punkten bei maximal 7 erreichbaren Punkten verbessert. Daraus wird deutlich, dass der Vortest zu schwierig war und erst die Items zur Überprüfung des Faktenwissens im Nachtest ein angemessenes Schwierigkeitsniveau hatten. Die Mittelwerte für die Summenscores in der Kategorie Verständnis unterscheiden sich vom Vor- zum Nachtest dagegen nur minimal. Im Vortest werden im Mittel 2,69 Punkte

erreicht, im Nachtest 3,16 Punkte. Da maximal 8 Punkte erreichbar waren, scheinen sowohl der Vortest als auch der Nachtest zu schwierig gewesen zu sein.

Tabelle VII-6: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte

		N	M	SD	Min	Max	Spannweite
Vortest	Summenscore gesamt (Item 1-15)	150	5,14	2,35	0	13	13
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-7)	150	2,45	1,62	0	7	7
	Summenscore Verständnis (Item 8-15)	150	2,69	1,37	0	7	7
Nachtest	Summenscore gesamt (Item 1-15)	150	7,69	2,50	1	13	12
	Summenscore Faktenwissen (Item 1-7)	150	4,53	1,67	0	7	7
	Summenscore Verständnis (Item 8-15)	150	3,16	1,49	0	6	6
Differenz NT-VT	Lernzuwachs gesamt (Item 1-15)	150	2,55	2,64	-5	9	14
	Zuwachs Faktenwissen (Item 1-7)	150	2,08	1,70	-3	6	9
	Zuwachs Verständnis (Item 8-15)	150	0,47	1,82	-4	5	9

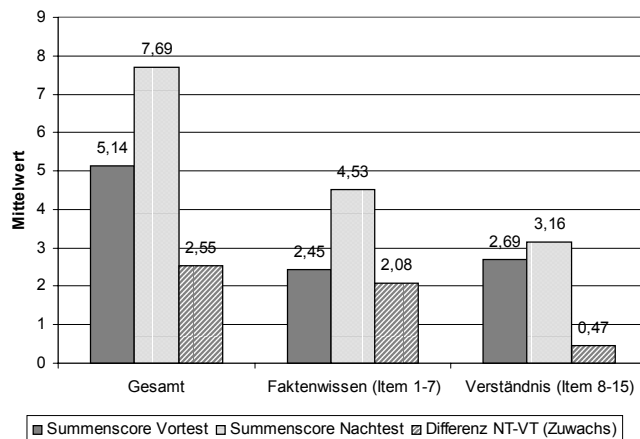


Abbildung VII-32: Mittelwerte für den Vor- und Nachtest sowie ihre Differenz in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis

4.1.4 Korrelationen zwischen den Lernergebnissen in Vor- und Nachtest

Zwischen den Vor- und Nachtestergebnissen bestehen in allen Kategorien des Lernerfolgs paarweise Zusammenhänge, von denen die meisten das Signifikanzniveau erreichen (s. Tabelle VII-7). Bei der Gesamtpunktzahl und dem Faktenwissen handelt es sich um mittlere Korrelationen zwischen den beiden Tests ($r(\text{Gesamtpunktzahl VT/NT})=0,410$, und $r(\text{Faktenwissen VT/NT})=0,462$; für beide ist $p<0,01$). Demgegenüber ist die Korrelation für das Verständnis zwischen Vor- und Nachtest als gering einzustufen ($r(\text{Verständnis VT/NT})=0,186$; $p<0,05$). Die Korrelationen deuten damit an, dass gute Vortestergebnisse die Nachtestergebnisse günstig beeinflussen.

Tabelle VII-7: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs. Die Kategorien, die trivialerweise hochsignifikant miteinander korrelieren, sind abgeblendet dargestellt.

			Vortest			Nachtest		
			Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	Summe Verständnis (Item 7-10)	Gesamtpunktzahl	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	Summe Verständnis (Item 7-10)
Vortest	Gesamtpunktzahl	r	1	0,824**	0,740**	0,410**	0,319**	0,332**
	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	r	-	1	0,229**	0,500**	0,462**	0,324**
	Summe Verständnis (Item 7-10)	r	-	-	1	0,111	0,001	0,186*
Nachtest	Gesamtpunktzahl	r	-	-	-	1	0,819**	0,766**
	Summe Faktenwissen (Item 1-6)	r	-	-	-	-	1	0,258**
	Summe Verständnis (Item 7-10)	r	-	-	-	-	-	1

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

4.2 Varianzanalysen zur Überprüfung der Forschungshypothesen

4.2.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

4.2.1.1 Die Auswirkung der Experimentalgruppen auf Faktenwissen und Verständnis der Primärreaktionen der Fotosynthese

Wie aus Tabelle VII-8 und Abbildung VII-33 ersichtlich, ist die Experimentalgruppe „Standbild“ der Experimentalgruppe „Animation“ in Bezug auf den *Lernzuwachs gesamt* und im *Zuwachs Verständnis* überlegen. Beim *Zuwachs Faktenwissen* ist der Unterschied minimal, weist jedoch auf eine geringe Überlegenheit der Animationsgruppe hin. Die Mittelwerte der Experimentalgruppe „Standbild“ betragen für den *Zuwachs Faktenwissen* 1,70 und für den Zuwachs im Verständnis 0,60. Die Experimentalgruppe „Animation“ erlangte dagegen im Mittel beim *Zuwachs Faktenwissen* 1,77 und beim *Zuwachs Verständnis* 0,20. Die statistische Auswertung mittels t-Test zeigt, dass die Unterschiede in den Mittelwerten aller drei abhängigen Variablen nicht das Signifikanzniveau erreichen (s. Tabelle VII-8). Damit kann die Hypothese, in der die Überlegenheit der Animationsversion im Hinblick auf das Verständnis komplexer biologischer Prozesse postuliert wird (s. III 2.1), auf der Basis dieser Ergebnisse nicht bestätigt werden. Das Ergebnis dieser Studie weist eher auf eine größere Wirksamkeit der Standbildversion für den *Zuwachs Verständnis* hin, der jedoch, wie bereits erwähnt, nicht signifikant ausfällt ($t(58)=0.466$, p n.s.). In Tabelle VII-8 sind die Ergebnisse für alle drei abhängigen Variablen angegeben.

Tabelle VII-8: Leistungsunterschiede bzgl. *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* für die Experimentalgruppen Standbild und Animation

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(58)
Lernzuwachs gesamt	Standbild	30	2,30	2,71	0,466 (n.s.)
	Animation	30	1,97	2,83	
Zuwachs Faktenwissen	Standbild	30	1,70	1,78	-0,154 (n.s.)
	Animation	30	1,77	1,57	
Zuwachs Verständnis	Standbild	30	0,60	1,87	0,826 (n.s.)
	Animation	30	0,20	1,88	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

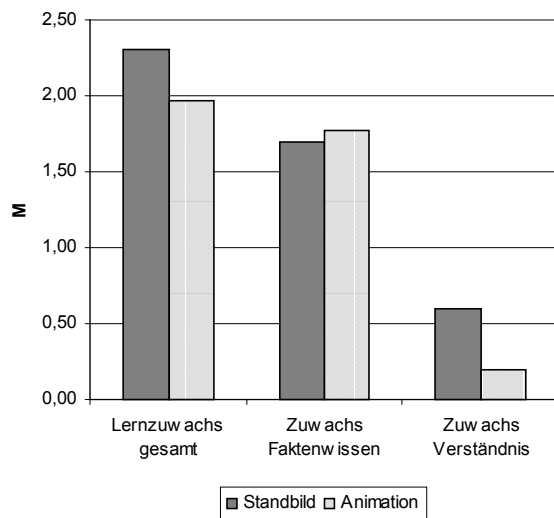


Abbildung VII-33: Mittelwerte der Experimentalgruppen Standbild und Animation für die drei abhängigen Variablen

4.2.1.2 Der Einfluss des Vorwissens

Definition des Lernermerkmals „Vorwissen“

Zur Definition der unabhängigen Variable „Vorwissen“ zum Thema „Primärreaktionen der Fotosynthese“ soll auch in dieser Untersuchung nur das bereits vorhandene Faktenwissen der Versuchspersonen herangezogen werden, nicht das Verständnis der Primärreaktionen der Fotosynthese. Entsprechend wurden nur diejenigen Items des Vortests berücksichtigt, die das themenspezifische Faktenwissen überprüfen (s. IX 6.9). Diese Definition befindet sich im Einklang mit in der Studie 1 vorgenommenen Operationalisierung des Vorwissens (s. V 4.2).

Von daher ist der Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen im Vortest und dem Verständnis in Vor- und Nachtest sowie dem Zuwachs in dieser Kategorie auch in dieser Studie von besonderem Interesse. Hier zeigen sich (z.T.) hochsignifikante Korrelationen von geringer bzw. mittlerer Größe zwischen den Kategorien. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Faktenwissen im Vortest und dem Verständnis im Vortest beträgt $r=0,229$ ($p<0,01$, s. Tabelle VII-9), zwischen Faktenwissen Vortest und Verständnis Nachtest $r=0,324$ ($p<0,01$, s. Tabelle VII-9). Keine Korrelation ergibt sich dagegen zwischen dem Faktenwissen Vortest und dem Zuwachs im Verständnis ($r=0,093$, p n.s.).

Tabelle VII-9: Bivariate Korrelationen zwischen dem Faktenwissen im Vortest und den Verständnisleistungen von Vor- bzw. Nachtest zum Thema „ Primärreaktionen der Fotosynthese“

		Verständnis Vortest	Verständnis Nachtest	Zuwachs Verständnis Differenz NT-VT
Faktenwissen Vortest	r	0,229**	0,324**	0,093
	N	150	150	150

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

Der Zusammenhang zwischen dem Faktenwissen im Vortest und der Verständnisleistung im Nachtest deutet darauf hin, dass das bereits vorhandene themenspezifische Faktenwissen bezüglich der Primärreaktionen der Fotosynthese einer Versuchsperson auch in dieser Studie als Prädiktor für den Lernerfolg im Hinblick auf das Verständnis fungieren könnte. Die Tatsache, dass sich zwischen dem Vorwissen und dem Zuwachs im Verständnis keine Korrelation ergibt, lässt sich durch die Höhe der beim Verständnis erzielten Zuwächse unter Berücksichtigung der Korrelation zwischen Faktenwissen Vortest und Verständnis Vortest mathematisch begründen. Das methodische Vorgehen und das hier angewendete Verfahren

wird an anderer Stelle noch einmal aufgegriffen und diskutiert (s. Abschnitt 5 in diesem Kapitel).

Zur Operationalisierung der unabhängigen Variable „Vorwissen“ werden jedoch zunächst zwei Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau (niedrig vs. hoch) durch eine Clusteranalyse auf der Basis ihres bereits vorhandenen themenspezifischen Faktenwissens eingeteilt.

Clusteranalyse zur Einteilung der Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau

Um die Interaktion zwischen den Experimentalgruppen und dem Vorwissen zu untersuchen, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt. Die beiden Vorwissensgruppen werden auf der Basis der Summenscores ermittelt, die von den Versuchspersonen im Faktenwissensteil des Vortests erreicht wurden. Die deskriptiven Statistiken für die beiden resultierenden Gruppen sind in Tabelle VII-10 und Tabelle VII-11 aufgeführt.

Tabelle VII-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“

<i>Geringes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-7) Vortest	118	0	3	1,78	0,99

Tabelle VII-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“

<i>Hohes Vorwissen</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Summe Faktenwissen (Item 1-7) Vortest	32	4	7	4,91	1,00

Aus der Tabelle VII-10 und der Tabelle VII-11 wird deutlich, dass die Gruppe „geringes Vorwissen“ 79% der Gesamtstichprobe umfasst. Diese Personen erreichen bezüglich des Faktenwissens im Vortest einen Score zwischen 0 und 3 Punkten. Personen, die 4 und mehr Punkte in diesem Teil des Tests erreichen, werden der zweiten Gruppe mit hohem Vorwissen zugeordnet. Aufgrund der schwachen Besetzung dieser Gruppe und aufgrund der Tatsache, dass ein Item mit einer Wahrscheinlichkeit von 25% zufällig richtig beantwortet werden kann, muss für das Vorwissen ein relativ geringes Niveau angenommen werden. Die gesamte Stichprobe ist damit hinsichtlich ihres Vorwissens weitestgehend homogen.

Ergebnisse der Varianzanalyse

Für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Experimentalgruppe“ (Standbild, Animation) und „Vorwissen“ (gering, hoch) durchgeführt. Wie der Tabelle VII-12 zu entnehmen ist, waren die Zuwächse beim Verständnis bei allen vier Gruppen sehr gering ($M < 1,0$). Ebenso gering fallen die Unterschiede zwischen diesen Gruppen aus. Personen mit hohem Vorwissen haben einen größeren Nutzen von beiden Versionen der Lernumgebung für ihr Verständnis. Ferner zeigen auch diese Ergebnisse eine Überlegenheit der Standbildversion. Versuchspersonen, die über ein geringes themenspezifisches Vorwissen verfügten und mit der Animationsversion gearbeitet haben, erzielten im Vergleich mit den anderen Gruppen die schlechtesten Resultate. Damit erwies sich die Standbildversion für Personen mit geringem Vorwissen im Gegensatz zur obigen Hypothese (s. III 2.1) als verständnisfördernder als die Animationsversion. Diese beobachteten Effekte erreichen jedoch in der zweifaktoriellen Varianzanalyse nicht das Signifikanzniveau.

Tabelle VII-12: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Standbild, Animation) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Standbild	gering	21	0,57	2,06
	hoch	9	0,67	1,41
Animation	gering	22	0,14	2,05
	hoch	8	0,38	1,41

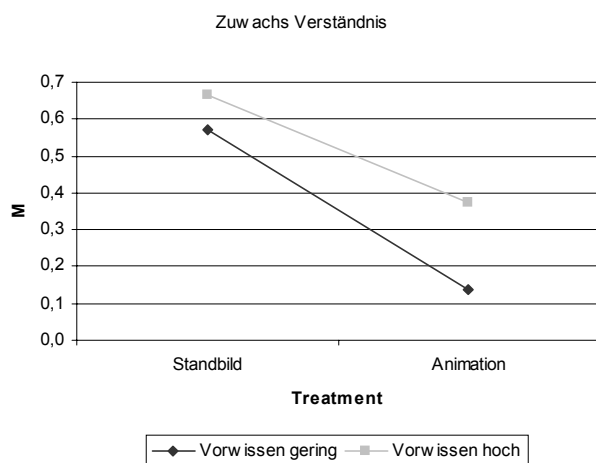


Abbildung VII-34: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis*

4.2.1.3 Der Einfluss der Lernpräferenz

Clusteranalyse zur Einteilung von Verbalisierern und Visualisierern

Die Einteilung der 150 Versuchspersonen in Verbalisierer und Visualisierer erfolgte durch eine Clusteranalyse auf der Basis der Mittelwerte der Skalen für die Variablen „verbale Lernpräferenz“ und „visuelle Lernpräferenz“. Durch diese Clusteranalyse wurden 81 Personen den Verbalisierern, 69 Personen den Visualisierern zugeteilt. Tabelle VII-13 und Tabelle VII-14 fassen die deskriptiven Statistiken für die beiden Cluster zusammen.

Tabelle VII-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“

<i>Verbalisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	81	0,83	3,00	2,20	0,51
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	81	0,00	1,75	1,01	0,38

Tabelle VII-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“

<i>Visualisierer</i>	N	Min.	Max.	M	SD
Verbale Lernpräferenz (Mittelwert Items ver1-6)	69	0,33	3,00	1,84	0,61
Visuelle Lernpräferenz (Mittelwert Items vis1-4)	69	1,50	3,00	2,19	0,47

Wie aus Tabelle VI-13 und Tabelle V-14 und auch aus dem Streudiagramm deutlich wird, in dem die Mittelwerte für die verbale und die visuelle Lernpräferenz gegeneinander aufgetragen sind (s. Abbildung VII-35), wird die Zugehörigkeit zu einer Gruppe vorwiegend nach der Höhe der mittleren visuellen Lernpräferenz entschieden. Dies wird daran deutlich, dass die verbale Lernpräferenz bei den Visualisierern im Mittel ähnlich stark ausgeprägt ist wie bei den Verbalisierern. Auf die Bildung von zwei Extremgruppen wurde dennoch verzichtet, um die Stichprobennzahlen in den nachfolgenden zweifaktoriellen Varianzanalysen nicht unter die Mindestanzahl für die Auswertung zu verkleinern.

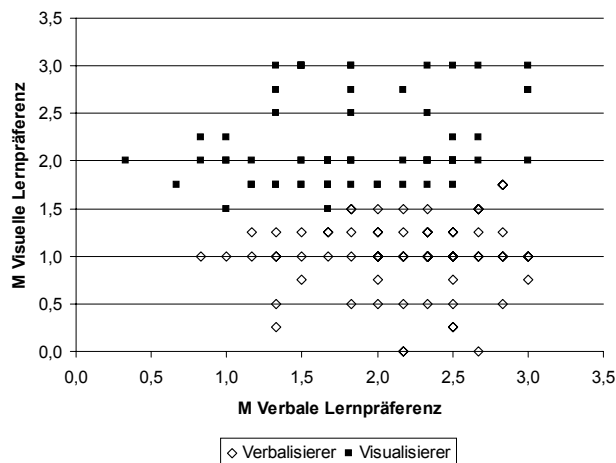


Abbildung VII-35: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“. Auf der Abszisse sind die Mittelwerte der verbalen Lernpräferenz, auf der Ordinate diejenigen für die visuelle Lernpräferenz aufgetragen.

Ergebnisse der Varianzanalysen

Für jede der drei abhängigen Variablen wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren „Experimentalgruppe“ (Standbild, Animation) und „Lernpräferenz“ (Verbalisierer, Visualisierer) durchgeführt. Bei diesen Analysen zeigten sich keine signifikanten Haupteffekte für die abhängigen Variablen. Der Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Experimentalgruppe und Lernpräferenz für den *Lernzuwachs gesamt* ($F(1,56)=7,27, p<0,01$) und den *Zuwachs Verständnis* ($F(1,56)=5,38, p<0,05$) erreichte dagegen das Signifikanzniveau. In diesem Fall profitierten allerdings die Verbalisierer von der Animationsversion, während sich die Standbildversion für die Visualisierer als vorteilhaft erwies. Abbildung VII-36 und Abbildung VII-38 zeigen die beschriebenen Interaktionseffekte für die Variablen *Lernzuwachs gesamt* und *Zuwachs Verständnis* (Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen s. Tabelle VII-15 – Tabelle VII-17).

Tabelle VII-15: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für *Lernzuwachs gesamt*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Lernzuwachs gesamt	SD
Standbild	Verbalisierer	18	1,44	2,48
	Visualisierer	12	3,58	2,61
Animation	Verbalisierer	10	3,10	2,88
	Visualisierer	20	1,40	2,70

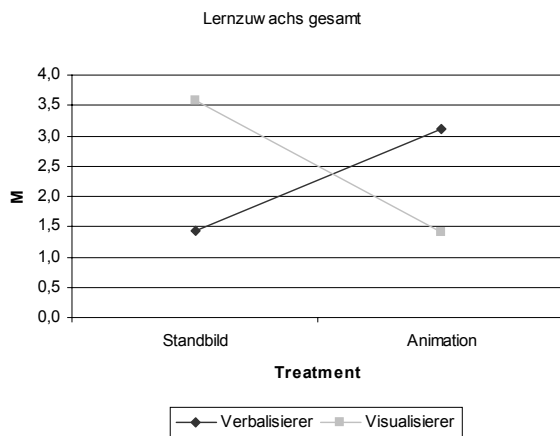


Abbildung VII-36: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Lernzuwachs gesamt*

Tabelle VII-16: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für den *Zuwachs Faktenwissen*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Zuwachs Faktenwissen	SD
Standbild	Verbalisierer	18	1,33	1,78
	Visualisierer	12	2,25	1,71
Animation	Verbalisierer	10	2,20	1,40
	Visualisierer	20	1,55	1,64

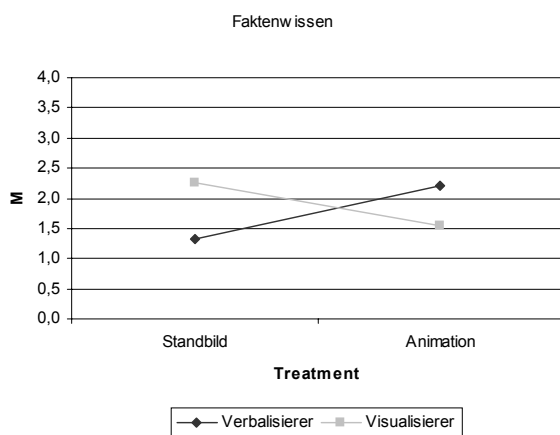


Abbildung VII-37: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Zuwachs Faktenwissen*

Tabelle VII-17: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für *Zuwachs Verständnis*

Experimentalgruppe	Lernpräferenz	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Standbild	Verbalisierer	18	0,11	1,91
	Visualisierer	12	1,33	1,61
Animation	Verbalisierer	10	0,90	1,91
	Visualisierer	20	-0,15	1,81

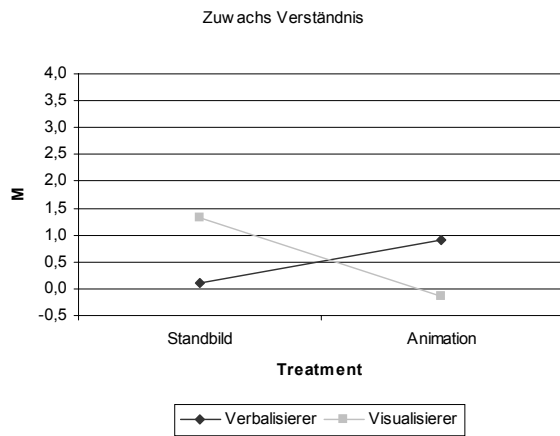


Abbildung VII-38: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable *Zuwachs Verständnis*

4.2.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Für eine erste Einschätzung der Wirksamkeit von Simulationen wurden die drei verschiedenen Simulationsgruppen ungeachtet ihres Grades an instruktionaler Unterstützung zu einer einzigen Gruppe zusammengefasst. Tabelle VII-18 und Abbildung VII-39 zeigen, dass die Gruppe „Simulationen“ in allen abhängigen Variablen bessere Mittelwerte aufweist als die Experimentalgruppe „Animation“. Ein t-Test ergibt jedoch keine signifikanten Mittelwertsunterschiede zwischen diesen beiden Gruppen. Tabelle VII-18 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle VII-18: Zuwächse in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppe „Animation“ und die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(118)
Lernzuwachs gesamt	Animation	30	1,97	2,83	-1,553 (n.s.)
	alle Simulationen	90	2,82	2,54	
Zuwachs Faktenwissen	Animation	30	1,77	1,57	-1,547 (n.s.)
	alle Simulationen	90	2,31	1,70	
Zuwachs Verständnis	Animation	30	0,20	1,88	-0,810 (n.s.)
	alle Simulationen	90	0,51	1,80	

(n.s.) p nicht signifikant; ° p<0,1; * p<0,05; ** p<0,01

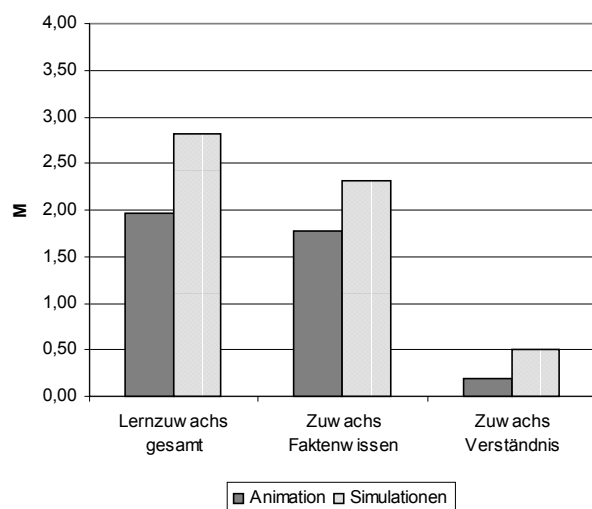


Abbildung VII-39: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ für die drei abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt*, *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis*

In einem zweiten Schritt wurde daher eine vierfach gestufte einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, die die Experimentalgruppe „Animation“ durch drei a-priori-Kontraste mit den einzelnen Simulationsgruppen vergleicht. Durch diese Analyse wurde deutlich, dass Personen der Experimentalgruppe „Animation“ signifikant schlechtere Ergebnisse beim Lernzuwachs gesamt ($t(116) = -2,420$, $p < 0,05$) und beim Zuwachs Faktenwissen ($t(116) = -2,782$, $p < 0,01$) erzielten als Personen, die mit der „Simulation 1“ lernten. Doch entgegen der Hypothese (s. III 2.2) konnten in keinem dieser Einzelvergleiche signifikante Unterschiede bezüglich der Verständnisleistung festgestellt werden. Abbildung VII-40 stellt die Mittelwertsunterschiede dar; Tabelle VII-19 fasst die Ergebnisse des Kontrasts Animation – Simulation 1 zusammen.

Tabelle VII-19: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation 1“.

Des Weiteren ist der T-Wert des zugehörigen Kontrasttests angegeben.

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(116)
Lernzuwachs gesamt	Animation	30	1,97	2,83	-2,420*
	Simulation 1	33	3,55	2,63	
Zuwachs Faktenwissen	Animation	30	1,77	1,57	-2,782**
	Simulation 1	33	2,91	1,49	
Zuwachs Verständnis	Animation	30	0,20	1,88	-0,943 (n.s.)
	Simulation 1	33	0,64	1,93	

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

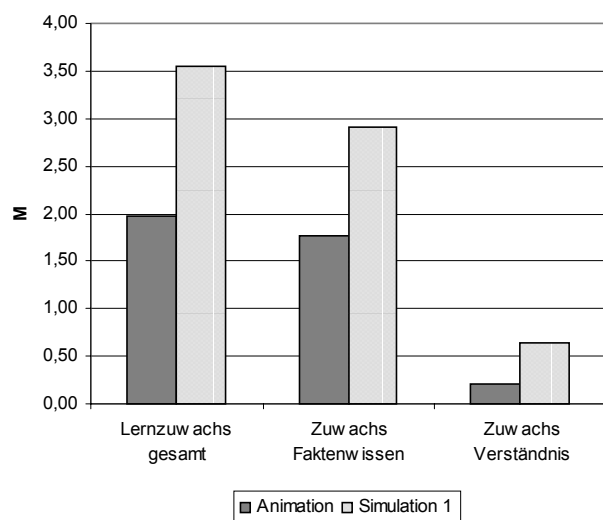


Abbildung VII-40: Mittelwertvergleiche der Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation 1“ für die drei abhängigen Variablen

4.2.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Für eine erste Abschätzung der Wirksamkeit von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen wurden analog zur obigen Vorgehensweise auch hier zunächst die Simulationsgruppen 2 und 3, die mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen wie Hinweisen zur korrekten Bearbeitungsreihenfolge bzw. Informationen zu den fachlichen Inhalten ausgestattet waren, zu einer einzigen Gruppe „Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen“ zusammengefasst. Diese wurde dann mit der Simulationsgruppe 1 verglichen, die lediglich über ein Minimum an solchen Hilfestellungen (nur Aufgaben und Lernkontrollfragen) verfügte. Der Mittelwertsvergleich von Simulationsgruppe 1 und der Gruppe „Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen“ mittels t-Test zeigt, dass erstere gegenüber der Gruppe mit den anderen beiden Versionen in allen abhängigen Variablen größere Mittelwerte aufweist (s. Abbildung VII-41). Die Mittelwertsunterschiede zwischen den beiden Gruppen erreichen das Signifikanzniveau (s. Tabelle VII-20) für die abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* ($t(88) = 2,096$, $p < 0,05$) und *Zuwachs Faktenwissen* ($t(88) = 2,621$, $p < 0,01$). Im *Zuwachs Verständnis* unterscheiden sich die beiden Gruppen dagegen nicht signifikant.

Tabelle VII-20: Gruppenvergleich der Mittelwerte in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen Simulation 1 und die Simulationen 2 und 3 (zusammengefasste Gruppe)

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(88)
Lernzuwachs gesamt	Simulation 1 (mit minimalen IH)	33	3,55	2,63	2,096*
	Simulation 2+3 (mit zusätzlichen IH)	57	2,40	2,40	
Zuwachs Faktenwissen	Simulation 1 (mit minimalen IH)	33	2,91	1,49	2,621**
	Simulation 2+3 (mit zusätzlichen IH)	57	1,96	1,73	
Zuwachs Verständnis	Simulation 1 (mit minimalen IH)	33	0,64	1,93	0,500 (n.s.)
	Simulation 2+3 (mit zusätzlichen IH)	57	0,44	1,73	

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; IH: instruktionale Hilfestellungen

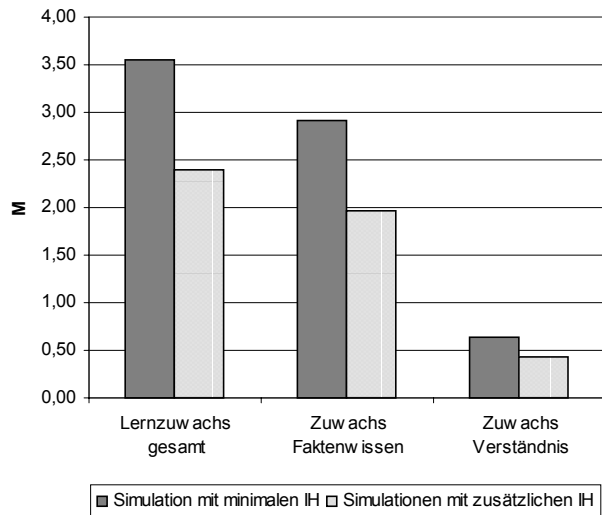


Abbildung VII-41: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Simulation 1“ (mit minimalen instruktionalen Hilfestellung) und zusammengefasste Gruppe „Simulation 2 + Simulation 3“ (Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen) für die drei abhängigen Variablen

Im Anschluss wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit dem dreifach gestuften Faktor „Experimentalgruppe“ und a-priori-Kontrasten durchgeführt. Diese Analyse ergab bei den Kontrasttests einen signifikanten Mittelwertsunterschied zwischen den Experimentalgruppen Simulation 1 und Simulation 3 im *Lernzuwachs gesamt* ($t(87)=2,156$, $p<0,05$) und im *Zuwachs Faktenwissen* ($t(87)= 2,733$, $p<0,01$) (s. Tabelle VII-21 und Abbildung VII-42). Im Gegensatz zur Hypothese (s. III 2.3) war kein entscheidender Vorteil der zusätzlichen instruktionalen Unterstützungen für die Verständnisleistung nachzuweisen, da der Unterschied in den Mittelwerten der abhängigen Variable Verständnis nicht das Signifikanzniveau erreichte. Daraus folgt, dass die hier eingesetzten zusätzlichen instruktionalen Maßnahmen nicht unbedingt den Lernerfolg, insbesondere nicht das Verständnis, fördern.

Tabelle VII-21: Stichprobe, Mittelwerte und Standardabweichung für den Vergleich der Experimentalgruppen Simulation 1 und Simulation 3.

Des Weiteren sind die T-Werte des Kontrasttests angegeben.

Abhängige Variable	Experimentalgruppe	N	M	SD	t(87)
Lernzuwachs gesamt	Simulation 1	33	3,55	2,63	2,156*
	Simulation 3	27	2,15	2,58	
Zuwachs Faktenwissen	Simulation 1	33	2,91	1,49	2,733**
	Simulation 3	27	1,74	1,79	
Zuwachs Verständnis	Simulation 1	33	0,64	1,93	0,485 (n.s.)
	Simulation 3	27	0,41	1,91	

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

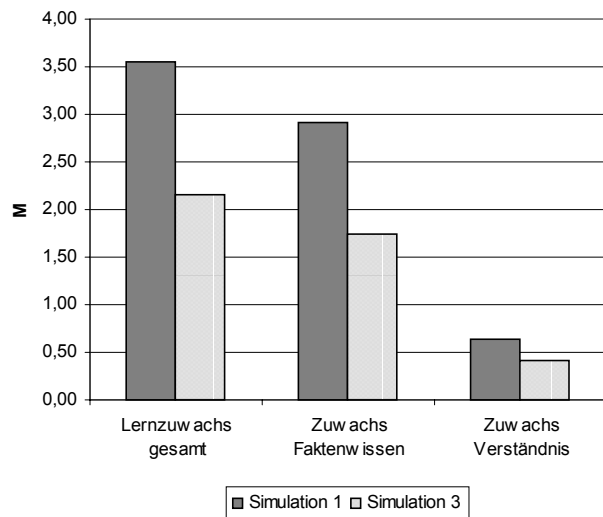


Abbildung VII-42: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Simulation 1“ (mit minimaler instruktionalen Hilfestellungen) und „Simulation 3“ (mit zusätzlichen instruktionaler Hilfestellungen) für die drei abhängigen Variablen

4.2.3.1 Der Einfluss des Vorwissens

Um eine Interaktion zwischen den Simulationsgruppen und dem Vorwissen zu untersuchen, wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Die Experimentalgruppen Simulation 2 und 3 (Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen) wurden zunächst wieder zu einer Gruppe zusammengefasst. Die Einteilung der Stichprobe in zwei Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissen – gering vs. hoch – basiert auf der in diesem Kapitel oben beschriebenen Clusteranalyse.

Wie in der Tabelle VII-22 gezeigt wird, ist die Anzahl der Personen mit hohem themenspezifischem Vorwissen deutlich kleiner als die der Personen mit geringem Vorwissen. Man erkennt ebenfalls, dass die Mittelwerte im *Zuwachs Verständnis* auch hier bei allen Gruppen ausgesprochen niedrig ausfallen. Die zweifaktorielle Varianzanalyse zeigte entsprechend auch keine signifikanten Effekte, weder für die Faktoren „Experimentalgruppe“ und „Vorwissen“ noch für die Interaktion dieser beiden Faktoren. Die Ergebnisse deuten jedoch an, dass Personen mit großem Vorwissen von den zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen profitieren können, während ebendiese den Zuwachs im Verständnis bei Personen mit geringem Vorwissen eher negativ beeinflussen (s. Abbildung VII-43).

Tabelle VII-22: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation 1, Simulation (2+3)) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Simulation 1 (mit minimalen IH)	gering	31	0,68	1,83
	hoch	2	0,00	4,24
Simulation 2+3 (mit zusätzlichen IH)	gering	44	0,25	1,77
	hoch	13	1,08	1,50

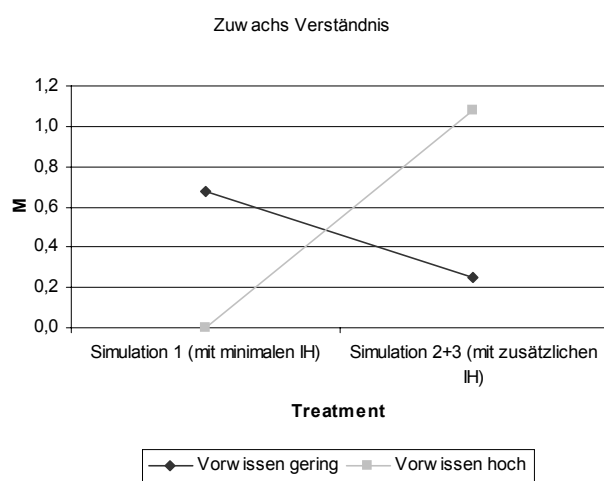


Abbildung VII-43: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis*

Diese Beobachtung wird noch deutlicher, wenn der Faktor Experimentalgruppe dreifach gestuft entsprechend der drei verschiedenen Simulationsversionen in die zweifaktorielle Varianzanalyse eingeht (s. Tabelle VII-23 und Abbildung VII-44). Der Zuwachs Verständnis sinkt bei Personen mit geringem Vorwissen umso mehr, je stärker die Simulationen instruktional unterstützt werden. Bei Personen mit großem Vorwissen deutet sich der gegenläufige Effekt an: hier verbessern sich die Ergebnisse für Zuwachs Verständnis mit vermehrter instruktionaler Unterstützung.

Durch diese Ergebnisse kann die Gültigkeit der Hypothese (s. III 2.3) insgesamt nicht bestätigt werden. Es gibt keinen überzeugenden Beleg dafür, dass instruktionale Hilfestellungen, die über das Minimum von Aufgabenstellungen und Lernkontrollfragen hinausgehen, für das Verständnis beim Lernen mit computergestützten Simulationen allgemein hilfreich sind. Nur Personen mit hohem Vorwissen nicht aber solche mit geringem Vorwissen scheinen von der zusätzlichen instruktionalen Unterstützung profitieren zu können.

Tabelle VII-23: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis* in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (dreifach gestuft; Simulation 1, 2 und 3) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Zuwachs Verständnis	SD
Simulation 1	gering	31	0,68	1,83
	hoch	2	0,00	4,24
Simulation 2	gering	24	0,33	1,66
	hoch	6	1,00	1,26
Simulation 3	gering	20	0,15	1,93
	hoch	7	1,14	1,77

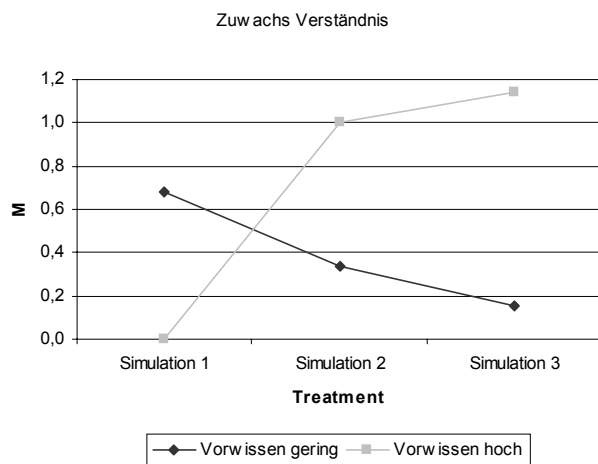


Abbildung VII-44: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Zuwachs Verständnis*

4.2.3.2 Kognitive Belastung

In den folgenden Analysen wird die *kognitive Belastung* als weitere abhängige Variable betrachtet. Gemäß der Hypothese (s. III 2.3) wurde mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse untersucht, ob es eine Interaktion zwischen den Simulationsgruppen (zweifach gestuft; Simulation 1 mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen und Simulation 2+3 mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen) und dem Vorwissen der Versuchspersonen (gering, hoch) bezüglich der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung gibt. Wie Tabelle VII-24 und Abbildung VII-45 zeigen, führten die Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen zu einer stärkeren kognitiven Belastung. Auch ergab sich, dass sich Personen mit geringem Vorwissen stärker als Personen mit hohem Vorwissen kognitiv belastet gefühlt haben. Die beschriebenen Effekte erreichen jedoch genau wie die Interaktion zwischen diesen beiden Faktoren nicht das Signifikanzniveau.

Tabelle VII-24: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für kognitive Belastung als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung, Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Hilfestellung) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Kognitive Belastung	SD
Simulation 1 (mit minimalen IH)	gering	31	1,87	0,61
	hoch	2	1,25	0,53
Simulation 2+3 (mit zusätzlichen IH)	gering	43	2,00	0,83
	hoch	12	1,68	0,75

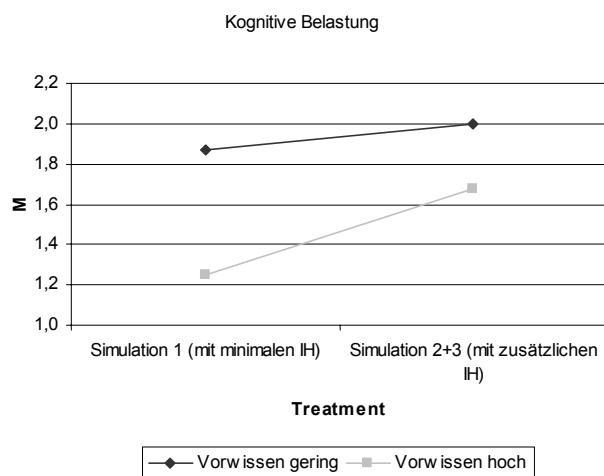


Abbildung VII-45: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable *Kognitive Belastung*

Wird der Faktor Experimentalgruppe entsprechend der drei Simulationsversionen dreifach gestuft betrachtet, erhält man einen tendenziellen Haupteffekt für das Vorwissen ($F(1,82)=2,971$, $p<0.1$) insgesamt (s. Tabelle VII-25 und Abbildung VII-46).

Tabelle VII-25: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für kognitive Belastung als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation 1, 2 und 3) und Vorwissen (gering, hoch)

Experimentalgruppe	Vorwissen	N	M Kognitive Belastung	SD
Simulation 1	gering	31	1,87	0,61
	hoch	2	1,25	0,53
Simulation 2	gering	23	1,99	0,80
	hoch	6	1,44	0,65
Simulation 3	gering	20	2,01	0,89
	hoch	6	1,92	0,82

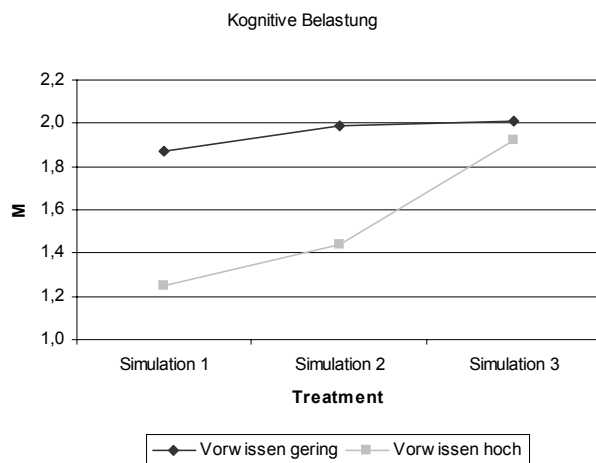


Abbildung VII-46: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable Kognitive Belastung

Wie der Tabelle VII-26 entnommen werden kann, korreliert jedoch die kognitive Belastung der Versuchspersonen (hoch) signifikant negativ mit den Zuwächsen der drei abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* ($r=-0,362$, $p<0,01$), *Zuwachs Faktenwissen* ($r=-0,276$, $p<0,01$) und *Zuwachs Verständnis* ($r=-0,253$, $p<0,01$).

Tabelle VII-26: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der Kognitiven Belastung und den drei Maßen des Lernerfolgs

		M Kognitive Belastung
Lernzuwachs gesamt	r	-0,362 **
	N	88
Zuwachs Faktenwissen	r	-0,276 **
	N	88
Zuwachs Verständnis	r	-0,253 *
	N	88

(n.s.) p nicht signifikant; ° $p<0,1$; * $p<0,05$; ** $p<0,01$

4.3 Analysen mit probabilistischen Testmodellen

Die varianzanalytischen Ergebnisse der Studie 3 zeigen ähnlich wie in Studie 2, dass eine Analyse des Lernerfolgs mithilfe inferenzstatistischer Verfahren problematisch ist. Die Clusteranalyse zur Einteilung zweier Vorwissensgruppen liefert eine ungleiche Aufteilung der Gesamtstichprobe: lediglich 21% aller Personen werden dem Cluster „hohes Vorwissen“ zugeordnet. Damit verfügte die Stichprobe mehrheitlich in Bezug auf die Primärreaktionen der Fotosynthese über unzureichende Vorkenntnisse. Ferner ergaben sich allgemein nur geringe Lernzuwächse in der Kategorie Verständnis. Damit einher gingen minimale Mittelwertsunterschiede zwischen den verschiedenen Experimentalgruppen im Hinblick auf diese abhängige Variable.

Da die Datenlage der Studie 3 derjenigen in Studie 2 stark ähnelt, wurden aus den gleichen Gründen auch hier probabilistische Testmodelle in Ergänzung zu den varianzanalytischen Verfahren zur Datenauswertung eingesetzt. Auf diese Weise wurde einerseits wieder die Passung quantifizierender Testmodelle überprüft. Andererseits wurde mithilfe klassifizierender Testmodelle ermittelt, ob in der gesamten Stichprobe *qualitative Personenunterschiede im Hinblick auf themenspezifisches Vorwissen und den Lernerfolg* über das Profil der Itemantworten zu identifizieren sind (s. IV 4.2). Auf der Basis des ausgewählten klassifizierenden Testmodells wurden wiederum Vergleiche zwischen den Experimentalgruppen durchgeführt, die eine Beurteilung der Wirksamkeit der verschiedenen Lernumgebungen unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens ermöglichen. Die klassifizierende Testauswertung liefert auch hier nur für diejenigen Forschungshypothesen eine Ausdifferenzierung der Ergebnisse, in denen die Wirksamkeit eines bestimmten Treatments unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens postuliert wird. Der Einfluss der Lernpräferenz und der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg wurden mithilfe dieses Verfahrens auch in Studie 3 nicht näher untersucht.

Nachfolgend werden die Ergebnisse vorgestellt, die auf der Datenanalyse mit probabilistischen Testmodellen basieren (s. IV 4.2). Zunächst soll mit einigen Vorbemerkungen die Verwendung probabilistischer Testmodelle für den Datensatz der Studie 3 erläutert werden (s. 4.3.1). Im Anschluss daran wird ein adäquates Testmodell für diesen Datensatz anhand von Modellgeltungsindices und Zuordnungswahrscheinlichkeiten ausgewählt (s. 4.3.2, 4.3.3 und 4.3.4). Nachfolgend werden die zugehörigen Itemprofile der ausgewählten Lösung vorgestellt (s. 4.3.5). Hieran schließt sich eine Analyse des Lernerfolgs für die Gesamtstichprobe auf der Basis dieser Itemprofile an (s. 4.3.6).

4.3.1 Vorbemerkungen zur probabilistischen Testauswertung

Analog zur Studie 2 wurden auch für Auswertung der Studie 3 einige Vorüberlegungen angestellt, welche Modellierungen für den Wissenstest zum Thema „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ sinnvoller Weise durchzuführen sind. Da der Wissenstest der Studie 3 Faktenwissen und Verständnis zum Thema „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ überprüft und so von der Konzeption identisch mit dem in Studie 2 ist, verwundert es nicht, dass in Studie 3 dieselben Modelle berechnet und verglichen wurden wie in Studie 2 (s. VI 4.3.1 und VI 4.3.2). In Studie 3 sollte einerseits wiederum überprüft werden, ob sich die Daten mithilfe eines quantitativen Modells, dem eindimensionalen Raschmodell, abbilden ließen (zur Bedeutung seiner Gültigkeit s. VI 4.3.1). Des Weiteren wurden abermals klassifizierende Testmodelle mit zwei bis vier latenten Klassen auf ihre Gültigkeit getestet. Die Ergebnisse der Modellgeltung zeigt der nächste Abschnitt.

4.3.2 Modellgeltung

Um die vorliegenden Daten adäquat erklären zu können, wurden die vier obengenannten probabilistische Testmodelle auf ihre Gültigkeit geprüft. Tabelle VII-27 zeigt die zugehörigen Modellgeltungsindices für die ausgewählten Testmodelle.

Tabelle VII-27: Geltung ausgewählter probabilistischer Testmodelle

Modell	BIC-Index	CAIC-Index
Eindimensionales Raschmodell (Rasch1)	5778,87	5794,87
Klassifizierendes Modell mit zwei latenten Klassen (LCA2)	5693,40	5724,40
Klassifizierendes Modell mit drei latenten Klassen (LCA3)	5722,31	5769,31
Klassifizierendes Modell mit vier latenten Klassen (LCA4)	5794,60	5857,60

4.3.3 Auswahl eines Testmodells

Das quantifizierende Rasch-Modell bildet als drittbestes Modell gemäß dem BIC- und CAIC-Index die Daten offenbar nur wenig adäquat ab (s. Tabelle VII-27). Eine qualitative Auswertung der Studie 3 scheint wie in Studie 2 ergänzend zu den quantitativen varianzanalytischen Testverfahren abermals angemessener zu sein. Obwohl der Zwei-Klassen-Lösung nach den Modellgeltungsindices BIC und CAIC der Vorzug zu geben wäre, wurde für die weitere Interpretation der Daten das zweitbeste klassifizierende Modell mit drei latenten Klassen (LCA3) ausgewählt. Die Itemprofile der 2- Klassen-Lösung weisen zwei

überschneidungsfreie Klassen auf, wobei die Itemprofile mit Ausnahme der ersten vier Items nahezu identisch sind. Diese Lösung liefert daher eher quantitative Unterschiede in den Lösungswahrscheinlichkeiten, aber keinen weiteren Aufschluss über die qualitativen Abweichungen in der Stichprobe. Dies ist der entscheidende Vorteil der 3-Klassen-Lösung, die wesentlich stärker differenzierte Itemprofile der ihrer latenten Klassen ergab. Sie ist damit auch im Hinblick auf das Vorwissen und den Lernerfolg besser interpretierbar und aufschlussreicher als die 2-Klassen-Lösung.

4.3.4 Zuordnungswahrscheinlichkeiten beim klassifizierenden Testmodell mit drei latenten Klassen (LCA3)

Ein weiteres Kriterium zur Überprüfung der Zuverlässigkeit des ausgewählten Testmodells sind die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den latenten Klassen (s. IV 4.2.4). Diese wurden hier zusätzlich zur Beurteilung der Modellgültigkeit herangezogen, da sich die 3-Klassen-Lösung nach den Modellgeltungsindices nicht als die beste Variante herausstellte.

Bei drei Klassen beträgt die minimale Wahrscheinlichkeit, einer der drei Klassen zugeordnet zu werden 33,3% – in diesem Fall wäre das Antwortmuster der Person keiner der drei Klassen eindeutig zuzuordnen. Die minimale Wahrscheinlichkeit, mit der eine unserer Versuchspersonen im ausgewählten Modell ihrer Klasse zugeordnet wird, beläuft sich auf 41,3%. Eine Zuordnungswahrscheinlichkeit <50% wird von lediglich 1,33% der Stichprobe erreicht. 71,3% der Versuchspersonen wurden ihren Klassen dagegen mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 90\%$ zugeordnet, 38% mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 99\%$ und sogar 17,3% mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 99,9\%$.

Die mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeiten und die dazugehörigen Standardabweichungen für jede der drei Klassen können Tabelle VII-28 entnommen werden. Auf diese Weise wurde überprüft, dass es keine ungünstigen Häufungen von geringen Zuordnungswahrscheinlichkeiten in einer speziellen Klasse gibt, was die Bedeutung dieser Klasse und damit die Zuverlässigkeit der gesamten Typologie in Frage stellen könnte. Die mittleren maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten für jede Klasse betragen stets über 80%. Die alternativen zugehörigen zweit- und dritthöchsten Zuordnungswahrscheinlichkeiten liegen dagegen für alle Klassen unter 11%. Auf dieser Basis wird die 3-Klassen-Lösung als verlässlich eingestuft.

Tabelle VII-28: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten [Standardabweichung] für die drei latenten Klassen des Modells

Klasse	Erwartete Größe		Zuordnungs- wahrscheinlichkeit	Zuordnungs- wahrscheinlichkeit	Zuordnungs- wahrscheinlichkeit
	N	N [%]	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
1	165	55,0	93,2% [13,4%]	6,1% [12,3%]	0,6% [2,6%]
2	68	22,7	9,7% [13,8%]	83,5% [15,4%]	6,8% [11,8%]
3	67	22,3	2,0% [5,6%]	10,9% [13,5%]	87,1% [15,6%]
Gesamt	300 ¹⁶	100			

4.3.5 Itemprofile der latenten Klassen der LCA3

Als probabilistisches Modell zur Erklärung der Daten in Studie 3 wurde ein Testmodell mit drei latenten Klassen ausgewählt. Im Folgenden werden die Itemprofile der resultierenden latenten Klassen grafisch dargestellt und näher erläutert.

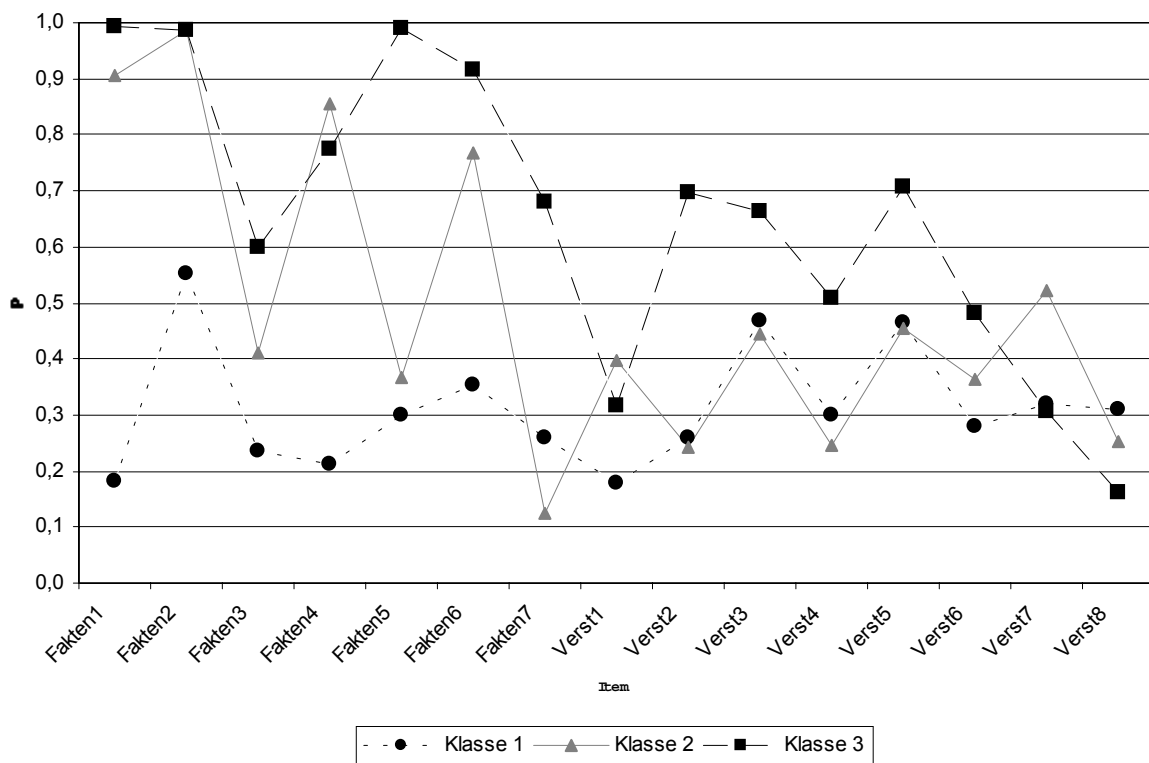


Abbildung VII-47: Itemprofile der drei latenten Klassen eines 3-Klassen-LCA-Modells für den gemeinsamen Datensatz bestehend aus Vor- und Nachtest.

Die Klasse 1 ist mit 53,7% der Versuchspersonen¹⁷ des modellierten Datensatzes die größte Klasse des betrachteten Modells. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Item richtig zu beantworten, bei fast allen Items nahe der Zufallswahrscheinlichkeit liegt. Die Zufallswahrscheinlichkeit beträgt bedingt durch die Testkonstruktion mit einer richtigen von vier möglichen Antworten 25%. Lediglich das Item 2 wird von dieser latenten Klasse mit einer Wahrscheinlichkeit von über 50% - und damit vergleichsweise sicher - richtig beantwortet. Die Versuchspersonen dieser Gruppe verfügen somit kaum über nennenswertes Faktenwissen oder Verständnis bezüglich der Primärreaktionen der Fotosynthese. Die Wahrscheinlichkeit, dass Personen dieser Klasse ein Faktenwissenitem richtig beantworten, beträgt im Mittel 29,9%. Die mittlere Wahrscheinlichkeit für die Verständnisitems erreicht 32,2%. Im Folgenden wird diese Gruppe als Klasse der *Nicht-Könnner* bezeichnet.

In der Klasse 2 werden 24,8% der Stichprobe eingeordnet. Hier werden Personen zusammengefasst, die nur spezielle Faktenwissenitems mit großer Wahrscheinlichkeit richtig beantworten. Daher wird die Klasse 2 im Folgenden *Fakten* genannt. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Items Fakten1, Fakten2, Fakten4 und Fakten6, die mit einer Wahrscheinlichkeit von über 75% richtig beantwortet werden (Mittlere Wahrscheinlichkeit für die Faktenwissenitems insgesamt: 63,0%). Anhand dieser Items kann geschlossen werden, dass den Personen die Summengleichung der Fotosynthese und der Gesamtvorgang in groben Zügen offenbar bekannt ist (s. IX 6.9). Im Gegensatz dazu werden die anderen Faktenwissenitems, die nähere Kenntnisse zum räumlichen Bau der Thylakoidmembran und Details zur Sequenzierung des Ablaufs erfordern, mit geringer Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet. Als letztes Kennzeichen dieser Klasse fällt auf, dass sich das Profil der Verständnisitems nicht von dem der *Nicht-Könnner* unterscheidet. Die mittlere Wahrscheinlichkeit für die Verständnisitems ist ähnlich niedrig wie die der Nicht-Könnner-Klasse (36,6%).

Die Klasse 3, im Folgenden als *Könnner* bezeichnet, unterscheidet sich in ihrem Profil sehr deutlich von den Klassen 1 und 2. Von der Gesamtstichprobe sind 21,4% der Versuchspersonen in diese Klasse einzuordnen. Die *Könnner* lösen die Faktenwissenitems sicher und stets mit einer Wahrscheinlichkeit größer als 60% (Mittelwert: 84,8%). Beim Verständnistest beantwortet diese Gruppe die Items mit den größten Wahrscheinlichkeiten richtig. Hier beträgt die mittlere Wahrscheinlichkeit 48,1%.

4.3.6 Analyse des Lernerfolgs der Gesamtstichprobe

Bei der latenten Klassenanalyse werden Veränderungen bezüglich des Wissensstandes durch einen Klassenwechsel vom Vor- zum Nachtest dokumentiert (s. IV 4.2.5). Diese Wanderungen werden in einer Kreuztabelle protokolliert (s. Tabelle VII-29). In den Zellen sind die Personenhäufigkeiten bzw. die Personenhäufigkeiten in Prozent angegeben. „Lernen“ ist dann bei der latenten Klassenanalyse durch einen Klassenwechsel vom Vor- zum Nachtest definiert und zwar so, dass die Personen von einer Klasse, in der die Antwortwahrscheinlichkeiten geringe Werte annehmen (von einer „niedrigeren“ Klasse), in eine Klasse mit insgesamt höheren Antwortwahrscheinlichkeiten (in eine „höhere“ Klasse) wechseln.

Tabelle VII-29: Kreuztabellierung des Klassenwechsels nach gemeinsamer Modellierung von Vor- und Nachtest. Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten (N) zu entnehmen.

		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	46	33	37	116
	Klasse 2 (Fakten)	2	10	13	25
	Klasse 3 (Köner)	1	0	8	9
	Gesamt	49	43	58	150

In den Zellen der Hauptdiagonalen befinden sich diejenigen Versuchspersonen, welche die Klasse, der sie im Vortest am wahrscheinlichsten angehörten, auch nach dem Treatment zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) noch angehören. Diese Personen behalten ihre Klassenzugehörigkeit bei und werden daher auch als „Stagnierende“ bezeichnet. Bei diesen Personen ist nach der obigen Definition zunächst kein Lernerfolg offensichtlich. Dennoch kann auch bei diesen Personen „Lernen“ anhand der Veränderung der mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeiten nachgewiesen werden. Diese verändern sich spezifisch für die drei Gruppen von „Stagnierenden“ (s. Tabelle VII-30 und Tabelle VII-31), und zwar im Allgemeinen so, dass die Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit zu „niedrigeren“ Klassen sinken, während die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu „höheren“ Klassen steigen. Dies soll nachfolgend an Beispielen näher erläutert werden.

Zuerst werden die „Stagnierenden“ betrachtet, die sowohl nach ihrem Vortest- wie auch Nachtestergebnis der Klasse der „Nicht-Köner“ zugeordnet wurden. Die Zuordnungswahrscheinlichkeit für die Klasse „Nicht-Köner“ beträgt zum Zeitpunkt T1 (Vortest) 97,9%. Zum Zeitpunkt T2 (Nachtest) ist die Zuordnungswahrscheinlichkeit für die Klasse „Nicht-Köner“ auf 88,5% gesunken. Dagegen sind aber die Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit zu Klasse „Fakten“ und zur Klasse „Köner“ von 2,1% auf 9,6% bzw. von 0,0% auf 1,9% gestiegen. Analog kann dieses für die Stagnierenden der Klasse „Fakten“ festgestellt werden. Hier steigt die Zuordnungswahrscheinlichkeit zur Köner-Klasse zum Zeitpunkt T2 von 0,1%, auf 16,6%, während gleichzeitig die Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die Nicht-Köner-Klasse von 12,5% auf 6,2% und für die Fakten-Klasse von 87,4% auf 77,3% sinken. Der Lernerfolg der Stagnierenden in der Köner-Klasse wird durch eine Vergrößerung der Zuordnungswahrscheinlichkeit von 88,9% auf 97,5% zum Messzeitpunkt T2 deutlich. Insgesamt lernen damit auch die Versuchspersonen, die ihre Klasse nicht wechseln. Der Lernerfolg der Stagnierenden kann somit anhand der veränderten Zuordnungswahrscheinlichkeiten sichtbar gemacht werden.

Tabelle VII-30: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von „Stagnierenden“

		Messzeitpunkt T1 (Vortest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner / Nicht-Köner (Stagnierende)	46	97,9%	2,1%	0,0%
Fakten / Fakten (Stagnierende)	10	12,5%	87,4%	0,1%
Köner / Köner (Stagnierende)	8	2,2%	8,9%	88,9%

Tabelle VII-31: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von „Stagnierenden“

		Messzeitpunkt T2 (Nachtest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner / Nicht-Köner (Stagnierende)	46	88,5%	9,6%	1,9%
Fakten / Fakten (Stagnierende)	10	6,2%	77,3%	16,6%
Köner / Köner (Stagnierende)	8	0,3%	2,2%	97,5%

Personen, die die Zellen unterhalb der Hauptdiagonalen in Tabelle VII-29 besetzen, wechseln von einer „höheren“ in eine „niedrigere“ Klasse. Diese Klassenwechsel wären nach der obigen Definition folgerichtig als „Verlernen“ zu interpretieren. Minimale Abweichungen im Antwortmuster der ersten Items führen zur Zurücksetzung dieser Versuchspersonen. Die maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt T2 fallen für diese beiden Gruppen jedoch deutlich geringer aus als die entsprechenden Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu T1 (s. Tabelle VII-32 und Tabelle VII-33). Aus dieser Perspektive betrachtet spricht die Zuordnung dieser Personen eher für einen Fehler im Rahmen des Modells als für ein wirkliches „Verlernen“.

Tabelle VII-32: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die beiden Gruppen von „Verlernern“

		Messzeitpunkt T1 (Vortest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Fakten / Nicht-Köner (Verlerner)	2	11,2%	88,7%	0,2%
Köner / Nicht-Köner (Verlerner)	1	0,8%	5,3%	93,9%

Tabelle VII-33: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachttest) für die beiden Gruppen von „Verlernern“

		Messzeitpunkt T2 (Nachttest)		
Klassenwechsel T1 / T2	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Fakten / Nicht-Köner (Verlerner)	2	81,9%	13,8%	4,3%
Köner / Nicht-Köner (Verlerner)	1	60,7%	39,3%	0,0%

Bei Personen, die in eine „höhere“ Klasse wechseln, hat sich das Antwortprofil vom Vor- zum Nachttest so verändert, dass in diesem Fall offensichtlich von einem Lernerfolg gesprochen werden kann (s. Abbildung VII-47). In Tabelle VII-29 befinden sich die dazugehörigen Zellen oberhalb der Hauptdiagonalen.

Nach dieser Definition lernen 55,3% der Gesamtstichprobe (83 von 150 Personen), während sich der Wissensstand bei 44,7% nicht verändert (Summe der Zellen auf der Hauptdiagonalen; 42,7% der Gesamtstichprobe bzw. 64 von 150 Personen) bzw. sogar noch verschlechtert (Summe der Zellen unterhalb der Hauptdiagonalen; 2% der Gesamtstichprobe bzw. 3 von 150 Personen). Diese 55,3% der Gesamtstichprobe, deren Lernerfolg durch einen Klassenwechsel offensichtlich wird, sollen im Folgenden differenzierter betrachtet werden.

Was haben die Versuchspersonen also gelernt, wenn sie ihre Klasse wechseln?

- 1. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Nicht-Köner“ in die Klasse „Fakten“ wechseln. Personen, die im Vortest der Nicht-Köner-Klasse zugeordnet werden, verfügen gemäß ihres Antwortprofils über keinerlei themenspezifisches Vorwissen. Wechseln diese nach dem Treatment in die Klasse „Fakten“, so kann ihr Lernerfolg als vornehmlicher Erwerb von Faktenwissen interpretiert werden. Dieses Faktenwissen bezieht sich auf die Kenntnis der Ausgangsstoffe und Produkte der Fotosynthesereaktionen sowie der Reaktionsgleichung. Die räumliche Anordnung der Komponenten in der Thylakoidmembran oder die Sequenzierung des Elektronentransports wird dagegen von diesen Personen nicht gelernt. Gemessen an den Personen, die über kein themenspezifisches Vorwissen verfügen (Nicht-Köner nach Vortestergebnis, N=116) erwerben 28,4% der Versuchspersonen dieses spezielle Faktenwissen.
- 2. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Nicht-Köner“ in die Klasse „Köner“ wechseln. Personen, die aus der Nicht-Köner-Klasse in die Köner-Klasse wechseln, verfügen über kein oder nur ganz geringes themenspezifisches Vorwissen. Wechseln diese Personen in die Köner-Klasse, erwerben sie einerseits Faktenwissen, das über das der Klasse „Fakten“ hinausgeht und auch die Kenntnis der räumlichen Anordnung der Komponenten in der Thylakoidmembran und die Sequenzierung des Prozesses mit einschließt. Andererseits weisen diese Personen nach der Lernsitzung zusätzlich ein Verständnis für die Vorgänge an der Thylakoidmembran auf. Damit erreichen 31,9% der Personen ohne Vorwissen (N=116) nach dem Treatment ein tieferes Verständnis für die Primärreaktionen der Fotosynthese.
- 3. Gruppe: Personen, die von der Klasse „Fakten“ in die Klasse „Köner“ wechseln. Personen, die von der Klasse „Fakten“ in die Klasse „Köner“ wechseln, verfügen gemäß ihres Vortestergebnisses über themenspezifisches Vorwissen, das auf der Kenntnis der Summengleichung der Fotosynthese beruht. Die Sequenzierung der Membranvorgänge oder die Prozesse im Detail sind ihnen dagegen nicht geläufig. Diese Art des Faktenwissens und darüber hinausgehende Verständnisleistungen werden von 52% der Personen mit Vorwissen (N=25) erst nach der computergestützten Lernsitzung im Nachtest erzielt.

Abbildung VII-48 fasst die Ergebnisse zusammen und stellt sie schematisch dar. Dabei wird die gesamte Stichprobe einmal nach dem Lernerfolg (Pfade von oben kommend) sowie nach dem Vorwissen aufgeteilt (Pfade von unten kommend). Die fettgedruckte Mitte der Abbildung VII-48 repräsentiert damit die Beziehung zwischen Vorwissen und Lernerfolg.

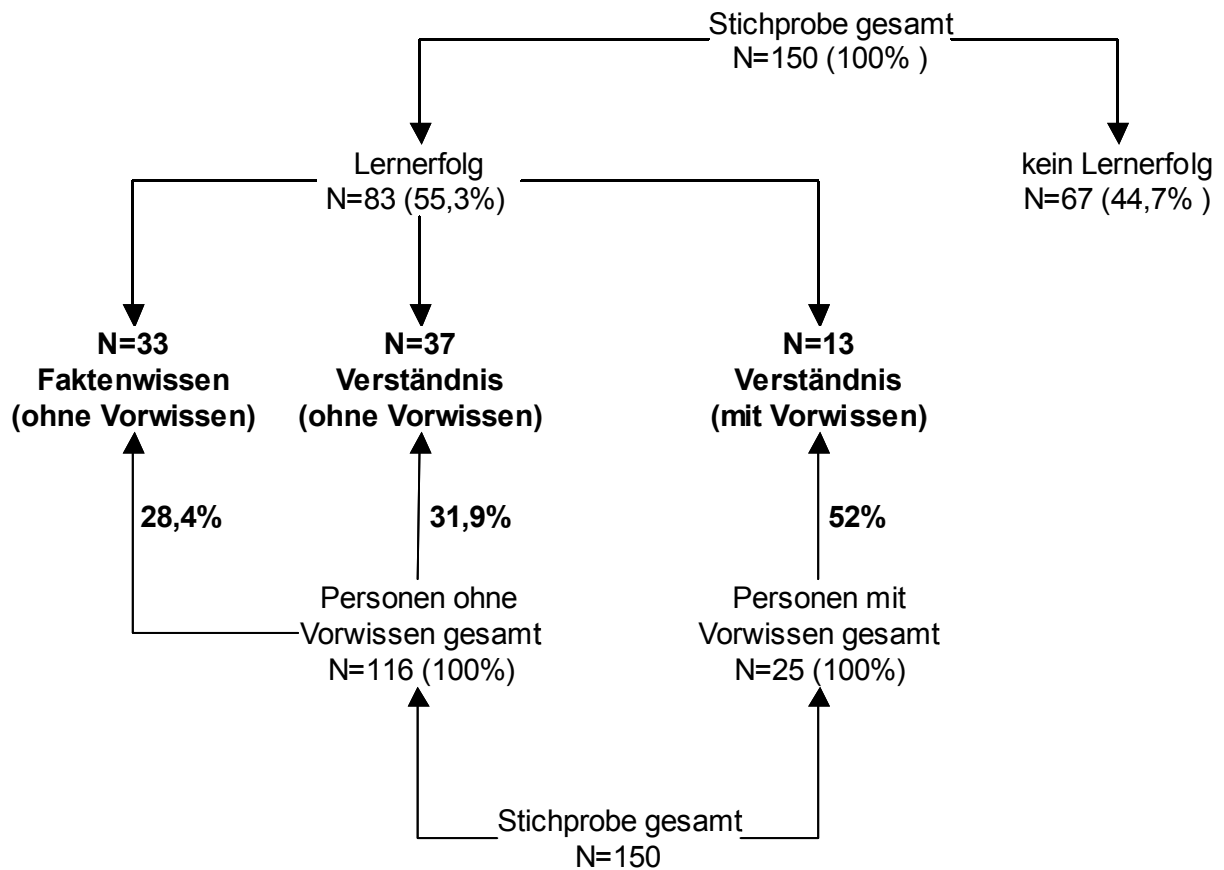


Abbildung VII-48: schematische Übersicht Lernerfolg unter Berücksichtigung des Vorwissens

4.4 Klassifizierende Testmodelle zur Überprüfung der Forschungshypothesen

In diesem Unterabschnitt wird das themenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen und ihr Lernerfolg im Hinblick auf die einzelnen Experimentalgruppen analysiert und zur Überprüfung der Forschungshypothesen vergleichend gegenübergestellt. Wie bereits erwähnt, ist nur bei denjenigen Forschungshypothesen eine Ausdifferenzierung der Ergebnisse möglich, bei denen die Wirksamkeit eines bestimmten Treatments unter Berücksichtigung des themenspezifischen Vorwissens postuliert wird. Der Einfluss der Lernpräferenz und der kognitiven Belastung auf den Lernerfolg wurden mithilfe der klassifizierenden Testmodelle nicht näher untersucht.

4.4.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

Bei der Experimentalgruppe „Animation“ weisen 50% der Gesamtstichprobe einen Lernerfolg auf. Dies sind 10% mehr als bei der Experimentalgruppe „Standbild“, in der nur 40% der Gesamtstichprobe einen Lernerfolg erreichen. Entgegen der Hypothese 2 (s. III 2.1) wirken sich die Animationen aber nicht positiv auf den Erwerb von Verständnis aus, sondern auf den Erwerb von Faktenwissen. Der Klassenwechsel von der Klasse „Nicht-Köner“ zu der Klasse „Fakten“ kann bei der Experimentalgruppe „Animation“ von 31,8% der Versuchspersonen ohne Vorwissen vollzogen werden, während es bei der Experimentalgruppe „Standbild“ nur 14,3% sind. Des Weiteren erwerben deutlich mehr Personen mit Vorwissen Verständnis als dies Personen ohne Vorwissen gelingt. Dieses gilt unabhängig von der Programmversion. Ferner profitieren die Versuchspersonen unabhängig vom Vorwissen in Bezug auf ihre Verständnisleistung von der Standbildversion. In Tabelle VII-34 werden diese Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle VII-34: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der beiden Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs und unter Berücksichtigung des Vorwissens.

Art des Lernerfolgs	Standbild	Animation	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	40,0%	50,0%	10,0%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	14,3%	31,8%	17,5%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	28,6%	22,7%	5,8%
Erwerb von Verständnis mit Vorwissen	60,0%	42,9%	17,1%

4.4.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Die Simulationen wirken sich in fast allen Arten des Lernerfolgs positiver aus als die Animation. Dies gilt somit auch unabhängig vom Vorwissen. Die geringsten Unterschiede in der Häufigkeit des Klassenwechsels findet man beim Erwerb von Faktenwissen (Animation: 31,8% vs. Simulationen: 31,5%). Betrachtet man den Experimentalgruppenvergleich im Hinblick auf den Erwerb von Verständnis und differenziert dabei nach unterschiedlichem Vorwissen, ergibt sich ein Zuwachs im Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen von 12,9% und ein Zuwachs im Erwerb von Verständnis mit Vorwissen von 11,0% (s. Tabelle VII-35).

Tabelle VII-35: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs

Art des Lernerfolgs	Animation	„Simulationen“	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	50,0%	62,2%	12,2%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	31,8%	31,5%	0,3%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	22,7%	35,6%	12,9%
Erwerb von Verständnis mit Vorwissen	42,9%	53,8%	11,0%

4.4.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Um eine Aussage über die verständnisfördernde Wirkung von Instruktionen machen zu können, wird abschließend die Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen (Simulation 1) mit den beiden Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen (Simulation 2 + Simulation 3) verglichen. Hier zeigt sich ein Vorteil der Simulation 1 (mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen) für den Lernerfolg insgesamt (s. Tabelle VII-36). Die Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen sind ausschließlich für den Erwerb von Faktenwissen von Vorteil. Die Simulation 1 (mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen) fördert hingegen vornehmlich den Erwerb von Verständnis. Diese verständnisfördernde Wirkung der Simulation 1 (mit minimaler instruktionaler Hilfestellung) gilt wiederum für Personen ohne und mit Vorwissen gleichermaßen.

Tabelle VII-36: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung“ (Simulation 1) und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Hilfestellung“ (Simulation 2 + Simulation 3) in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs.

IH: Abkürzung für „instruktionale Hilfestellungen“

Art des Lernerfolgs	Simulation mit minimaler IH	Simulationen mit zusätzl. IH	Differenzbetrag absolut
Lernerfolg insgesamt	66,7%	59,6%	7,0%
Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen	24,1%	36,4%	12,3%
Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen	44,8%	29,5%	15,3%
Erwerb von Verständnis mit Vorwissen	66,7%	50,0%	16,7%

4.5 Zusammenfassung

Tabelle VII-37: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Studie 3 in tabellarischer Übersicht

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)
Kategorien des themenspezifischen Wissens bzgl. der Primärreaktionen der Fotosynthese	<ul style="list-style-type: none"> • Faktenwissen (definiert durch die Items 1-7 im Vor- und Nachtest) • Verständnis (definiert durch die Items 8-15 in Vor- und Nachtest) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Wissen (definiert durch das Itemprofil der Klasse 1; s. 4.3.5 in diesem Kapitel) • Faktenwissen (definiert durch das Itemprofil der Klasse 2; s. 4.3.5 in diesem Kapitel) • Verständnis (definiert durch das Itemprofil der Klasse 3; s. 4.3.5 in diesem Kapitel)
Messung des Lernerfolgs	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die Differenzen der Summenscores aus Nach- und Vortest, wobei nur die Items der entsprechenden Wissenskategorie berücksichtigt werden (s. IV 4.1.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die absoluten bzw. rel. Personenhäufigkeiten [N bzw. N%] für solche Klassenwechsel, die von einer niedrigen in eine höhere Klasse erfolgen (s. 4.3.6)
Deskriptive Statistik/ Lernerfolg für die gesamte Stichprobe	<ul style="list-style-type: none"> • M [SD] Lernzuwachs gesamt (Item 1-15): 2,55 [2,64] • M [SD] Zuwachs Faktenwissen (Item 1-7): 2,08 [1,70] • M [SD] Zuwachs Verständnis (Item 8-15): 0,47 [1,82] 	<ul style="list-style-type: none"> • N [N%] Lernerfolg gesamt: 83 [55,3%] • N [N%] Faktenwissen (ohne Vorwissen): 33 [28,4%] • N [N%] Verständnis (ohne Vorwissen): 13 [52,0%] • N [N%] Verständnis (mit Vorwissen):

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)																					
Hypothese 1	<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• M [SD] Lernzuwachs gesamt:</td> <td>2,30 [2,71]</td> <td>1,97 [2,83]</td> </tr> <tr> <td>• Keine signifikanter Effekt</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Standbild	Animation	• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	2,30 [2,71]	1,97 [2,83]	• Keine signifikanter Effekt			<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N % Lernerfolg insgesamt:</td> <td>40,0%</td> <td>50,0%</td> </tr> </tbody> </table>		Standbild	Animation	N % Lernerfolg insgesamt:	40,0%	50,0%						
	Standbild	Animation																					
• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	2,30 [2,71]	1,97 [2,83]																					
• Keine signifikanter Effekt																							
	Standbild	Animation																					
N % Lernerfolg insgesamt:	40,0%	50,0%																					
Hypothese 2	<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:</td> <td>1,70 [1,78]</td> <td>1,77 [1,57]</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Verständnis:</td> <td>0,60 [1,87]</td> <td>0,20 [1,88]</td> </tr> <tr> <td>• Keine signifikanten Effekte</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Standbild	Animation	• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	1,70 [1,78]	1,77 [1,57]	• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,60 [1,87]	0,20 [1,88]	• Keine signifikanten Effekte			<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:</td> <td>14,3%</td> <td>31,8%</td> </tr> </tbody> </table>		Standbild	Animation	• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	14,3%	31,8%			
	Standbild	Animation																					
• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	1,70 [1,78]	1,77 [1,57]																					
• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,60 [1,87]	0,20 [1,88]																					
• Keine signifikanten Effekte																							
	Standbild	Animation																					
• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	14,3%	31,8%																					
Hypothese 3	<table border="0"> <thead> <tr> <th>M [SD] Zuwachs Verständnis</th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• Für geringes Vorwissen:</td> <td>0,57 [2,06]</td> <td>0,14 [2,05]</td> </tr> <tr> <td>• Für hohes Vorwissen:</td> <td>0,67 [1,41]</td> <td>0,38 [1,41]</td> </tr> <tr> <td>• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	M [SD] Zuwachs Verständnis	Standbild	Animation	• Für geringes Vorwissen:	0,57 [2,06]	0,14 [2,05]	• Für hohes Vorwissen:	0,67 [1,41]	0,38 [1,41]	• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte			<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Standbild</th> <th>Animation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:</td> <td>28,6%</td> <td>22,7%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:</td> <td>60,0%</td> <td>42,9%</td> </tr> </tbody> </table>		Standbild	Animation	• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	28,6%	22,7%	• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	60,0%	42,9%
M [SD] Zuwachs Verständnis	Standbild	Animation																					
• Für geringes Vorwissen:	0,57 [2,06]	0,14 [2,05]																					
• Für hohes Vorwissen:	0,67 [1,41]	0,38 [1,41]																					
• Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte																							
	Standbild	Animation																					
• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	28,6%	22,7%																					
• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	60,0%	42,9%																					
Hypothese 4	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisierer erreichen bessere Ergebnisse mit der Standbildversion als mit der Animationsversion • Verbalisierer erreichen bessere Ergebnisse mit der Animationsversion als mit der Standbildversion • Keine signifikanten Haupteffekte • Interaktionseffekte: Lernzuwachs gesamt $p < 0,01$, Zuwachs Verständnis $p < 0,05$ 																						

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)																																				
Hypothese 5	<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Animation</th> <th>Alle Simulationen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• M [SD] Lernzuwachs gesamt:</td> <td>1,97 [2,83]</td> <td>2,82 [2,54]</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:</td> <td>1,77 [1,57]</td> <td>2,31 [1,70]</td> </tr> <tr> <td>• M [SD] Zuwachs Verständnis:</td> <td>0,20 [1,88]</td> <td>0,51 [1,80]</td> </tr> <tr> <td>• Keine signifikanten Effekte</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>• Einzelvergleiche: Animation < Simulation 1 (mit minimaler instruktionaler Hilfestellung);</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>• Lernzuwachs gesamt $p < 0,05$, Zuwachs Faktenwissen $p < 0,01$</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Animation	Alle Simulationen	• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	1,97 [2,83]	2,82 [2,54]	• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	1,77 [1,57]	2,31 [1,70]	• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,20 [1,88]	0,51 [1,80]	• Keine signifikanten Effekte			• Einzelvergleiche: Animation < Simulation 1 (mit minimaler instruktionaler Hilfestellung);			• Lernzuwachs gesamt $p < 0,05$, Zuwachs Faktenwissen $p < 0,01$			<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Animation</th> <th>Alle Simulationen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• N % Lernerfolg insgesamt:</td> <td>50,0%</td> <td>62,2%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:</td> <td>31,8%</td> <td>31,5%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:</td> <td>22,7%</td> <td>35,6%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:</td> <td>42,9%</td> <td>53,8%</td> </tr> </tbody> </table>		Animation	Alle Simulationen	• N % Lernerfolg insgesamt:	50,0%	62,2%	• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	31,8%	31,5%	• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	22,7%	35,6%	• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	42,9%	53,8%
	Animation	Alle Simulationen																																				
• M [SD] Lernzuwachs gesamt:	1,97 [2,83]	2,82 [2,54]																																				
• M [SD] Zuwachs Faktenwissen:	1,77 [1,57]	2,31 [1,70]																																				
• M [SD] Zuwachs Verständnis:	0,20 [1,88]	0,51 [1,80]																																				
• Keine signifikanten Effekte																																						
• Einzelvergleiche: Animation < Simulation 1 (mit minimaler instruktionaler Hilfestellung);																																						
• Lernzuwachs gesamt $p < 0,05$, Zuwachs Faktenwissen $p < 0,01$																																						
	Animation	Alle Simulationen																																				
• N % Lernerfolg insgesamt:	50,0%	62,2%																																				
• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	31,8%	31,5%																																				
• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	22,7%	35,6%																																				
• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	42,9%	53,8%																																				

	Inferenzstatistische Verfahren (s. 4.1 und 4.2 in diesem Kapitel)	Latente Klassenanalyse (s. 4.3 und 4.4 in diesem Kapitel)															
Hypothese 6a	<p>M [SD] Zuwachs Verständnis Simulation 1 Simulation m. IH</p> <ul style="list-style-type: none"> Für geringes Vorwissen: 0,68 [1,83] 0,25 [1,77] Für hohes Vorwissen: 0,00 [4,24] 1,08 [1,50] Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte Einzelvergleiche: Simulation 3 < Simulation 2 < Simulation 1 für Personen mit geringem Vorwissen Simulation 1 < Simulation 2 < Simulation 3 für Personen mit hohem Vorwissen Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte 	<table> <thead> <tr> <th></th> <th>Simulation 1</th> <th>Simulationen m. IH</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• N % Lernerfolg insgesamt:</td> <td>66,7%</td> <td>59,6%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:</td> <td>24,1%</td> <td>36,4%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:</td> <td>44,8%</td> <td>29,5%</td> </tr> <tr> <td>• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:</td> <td>66,7%</td> <td>50,0%</td> </tr> </tbody> </table>		Simulation 1	Simulationen m. IH	• N % Lernerfolg insgesamt:	66,7%	59,6%	• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	24,1%	36,4%	• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	44,8%	29,5%	• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	66,7%	50,0%
	Simulation 1	Simulationen m. IH															
• N % Lernerfolg insgesamt:	66,7%	59,6%															
• N % Erwerb von Faktenwissen ohne Vorwissen:	24,1%	36,4%															
• N % Erwerb von Verständnis ohne Vorwissen:	44,8%	29,5%															
• N % Erwerb von Verständnis mit Vorwissen:	66,7%	50,0%															
Hypothese 6b	<p>M [SD] kognitive Belastung Simulation 1 Simulation m. IH</p> <ul style="list-style-type: none"> Für geringes Vorwissen: 1,87 [0,61] 2,00 [0,83] Für hohes Vorwissen: 1,25 [0,53] 1,68 [0,75] Weder signifikante Haupt- noch Interaktionseffekte Einzelvergleiche: Simulation 1 < Simulation 2 < Simulation 3 Personen mit hohem Vorwissen < Personen mit geringem Vorwissen Tendenzieller Haupteffekt für das Vorwissen: $p < 0,1$ 																

5 DISKUSSION

Analog zur Studie 2 wurde in der Studie 3 die Wirksamkeit der unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten computergestützter Lernumgebungen auf das Erlernen eines weiteren komplexen biologischen Inhalts, hier der Primärreaktionen der Fotosynthese, untersucht. Dabei sollte geklärt werden, inwiefern Animation und Simulation dazu geeignet sind, das Verständnis dieses komplexen Lerngegenstandes zu fördern. Hierbei wurde ferner der Einfluss der moderierenden Variablen Vorwissen und Lernpräferenz auf den Lernerfolg analysiert. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Studie 3 zu den Forschungshypothesen diskutiert. Da die Daten dieser Untersuchung auch mit den beiden sich ergänzenden Auswertungsverfahren (Inferenzstatistik und klassifizierende Testauswertung mit probabilistischen Testmodellen) analysiert wurden, sollen hierbei Verknüpfungen zwischen den einzelnen Befunden hergestellt werden und vor dem theoretischen Hintergrund der Multimediaforschung diskutiert werden. Damit werden auch diese Ergebnisse in den aktuellen Forschungsstand eingebunden und es wird gezeigt, inwieweit sich die positiven Wirkungen der genannten Gestaltungsweisen für einen weiteren biologischen Lerninhalt replizieren lassen.

Im Abschnitt 1 wird die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern diskutiert. Im Abschnitt 2 wird die Wirksamkeit Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung dargestellt, bevor im Abschnitt 3 auf die Wirksamkeit von instruktionalen Maßnahmen beim Lernen mit Simulationen eingegangen wird. Im Abschnitt 4 werden die Lernergebnisse der Gesamtstichprobe unter Berücksichtigung des Vorwissens erörtert.

5.1 Die Wirkung von Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern

Der erste Hypothesenkomplex befasst sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von stehenden Bildern und Animationen. Dabei wird der Animation in Kombination mit Texten eine größere Wirksamkeit im Hinblick auf den Lernerfolg bei biologischen Prozessen zugeschrieben (Hypothese 1). Ferner wird erwartet, dass sich die spezifisch lernförderliche Wirkung der Animation auf das Verständnis beschränkt, wobei das Faktenwissen im Vergleich zum Lernen mit stehenden Bildern nicht verbessert werde (Hypothese 2). Bei Berücksichtigung der individuellen Lernerkmale wird vermutet, dass sich die verständnisfördernde Wirkung der Animation vorwiegend bei Personen mit geringem Vorwissen

einerseits (Hypothese 3) und andererseits bei Personen mit visueller Lernpräferenz, den Visualisierern, (Hypothese 4) entfaltet.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern im Hinblick auf den *Lernzuwachs* *gesamt* und differenziert nach der Lernleistung in die Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis*

In der Studie 3 wirkte sich die animierte Lernumgebung nicht positiver auf den Lernerfolg aus als die Standbildversion. Die varianzanalytische Auswertung ergab im Gegenteil einen kleinen nicht signifikanten Vorteil für die Standbildversion im Hinblick auf den *Lernzuwachs gesamt*. Die klassifizierende Testauswertung zeigt dagegen, dass es aus der Experimentalgruppe „Animation“ im Verhältnis mehr Personen gelingt, die Klasse zu wechseln. Dieser Widerspruch lässt sich durch die weitere Aufschlüsselung des Lernerfolges in Faktenwissen und Verständnis aufklären. Personen die mit der animierten Lernumgebung gelernt haben, wechseln häufiger in die Klasse „Fakten“ als Personen der Experimentalgruppe „Standbild“ und erwerben damit Faktenwissen, das durch das Itemprofil dieser Klasse definiert wird. Im Hinblick auf den Zuwachs im Verständnis erweist sich die animierte Darstellung jedoch nicht als lernförderlicher für die Prozesse an der Thylakoidmembran. Hier ergab sich stattdessen ein kleiner, jedoch nicht signifikanter Vorteil der Standbildversion.

Die Ergebnisse der Studie 3 stehen damit im Gegensatz zu den Befunden, die von den positiven Effekten animierter Darstellungen für das Prozessverständnis berichten (Mayer, 1997; Rieber & Kini, 1991). Auch in dieser Untersuchung zeigte sich wieder, dass die Darstellungen von Bewegungen in stehende Bildern mit Hilfe von Pfeilen den Versuchspersonen soweit vertraut ist, dass sie ein gleich gutes oder sogar besseres Prozessverständnis anregen wie animierte Darstellungen. Damit stützen diese Ergebnisse der Studie die Resultate der Multimediaforschung, die ergaben, dass Videos und Animationen im Vergleich zu stehenden Bildern die Aufmerksamkeit der Lernenden verringern (Salomon, 1984) oder darüber hinaus kognitive Strategien anregen könnten, die weniger dazu geeignet sind, ein tieferes Prozessverständnis zu initiieren (Lewalter, 1997). Insgesamt können die Ergebnisse der Studie 3 die Hypothese 1 und die Hypothese 2 nicht bestätigen. Sie stellen damit genau wie die Ergebnisse der Studie 2 die problemlose Übertragung der bisherigen empirischen Befunde aus der Literatur auf komplexe biologische Inhalte in Frage.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernervariable „Vorwissen“

Wie in der Hypothese 3 formuliert, wird vom themenspezifischen Vorwissen der Lernenden angenommen, dass es wesentlich den Lernerfolg im Hinblick auf die Verständnisleistung beeinflusst. Es ist damit eine derjenigen lernerspezifischen Differenzierungen, die im Hinblick auf das Unterrichtsgeschehen beim Lernen mit Animationen vorzunehmen sind.

In dieser Studie deuten sich Haupteffekte für das Vorwissen und die Lernumgebung an. Personen mit hohem Vorwissen profitierten stärker von beiden Lernumgebungen für ihr Verständnis als Personen mit geringem Vorwissen. Des Weiteren erwies sich die Standbildversion gegenüber der animierten Darstellung als lernförderlicher. Die beobachteten Effekte erreichen allerdings nicht das Signifikanzniveau. Die Ergebnisse der klassifizierenden Testauswertung untermauern diese Tendenzen beim Vergleich der beiden Experimentalgruppen: es gelingt Personen mit Vorwissen im Verhältnis häufiger, in die Könner-Klasse zu wechseln und darüber hinaus erfolgt dieser Wechsel dann verstärkt, wenn die Personen mit der Standbildversion gelernt haben.

Vergleiche zwischen den beiden Vorwissensgruppen sind aufgrund der unterschiedlichen Stichprobengrößen problematisch. In dieser Studie verfügt nach der Clusteranalyse, die im Rahmen der inferenzstatistischen Verfahren zur Einteilung zweier Vorwissensgruppen durchgeführt wurde, nur ungefähr $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der Stichproben in beiden Experimentalgruppen über nennenswertes Vorwissen. Dieses Ergebnis wird von der klassifizierenden Testauswertung gestützt: von der Gesamtstichprobe werden knapp $\frac{1}{4}$ der Versuchspersonen in die in die Klasse „Fakten“ und die Klasse „Könner“ nach ihrem Vortestergebnis eingeordnet. Ein direkter Vergleich zwischen Personen mit geringen und hohem themenspezifischen Vorwissen ist in dieser Stichprobe damit schwierig und kaum auf andere Personengruppen mit unterschiedlichem Vorwissensniveau übertragbar.

Die Gesamtstichprobe erwirbt aufgrund ihres Vorwissensdefizit im Rahmen der Lernsitzung vorwiegend Faktenwissen. Dies wird an den Itemprofilen der klassifizierenden Testauswertung deutlich. Tieferes Verständnis der Vorgänge an der Thylakoidmembran erwerben nur Personen, die nach der Lernsitzung in die Könner-Klasse wechseln. Dieser Klasse gehören in beiden Experimentalgruppen ungefähr $\frac{1}{4}$ der Personen mit geringem Vorwissen bzw. die Hälfte der Personen mit Vorwissen an, wobei in der Experimentalgruppe „Standbild“ im Verhältnis zur Animationsversion mehr Personen diesen Klassenwechsel gelingt. Diese Ergebnisse zeigen also einen allgemein geringen Zuwachs im Verständnis. Insbesondere kann ein kompensatorischer Effekt animierter Darstellungen hinsichtlich der Verständnisdefizite für Personen mit geringem Vorwissen daraus nicht abgeleitet werden.

Hierzu hätten die Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen deutlicher ausfallen müssen. Die Befunde aus der Literatur, die die verständnisfördernde Wirkung animierter Darstellungen bei Personen mit geringem Vorwissen belegten (Lewalter 1997; Mayer 2001, 1997; Mayer & Gallini 1990), können deshalb nicht uneingeschränkt auf einen komplexen biologischen Lerngegenstand übertragen werden.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernervariable „Lernpräferenz“

Wie in der Hypothese 4 formuliert, könnte ein weiterer den Lernerfolg moderierender Faktor die individuelle Lernpräferenz der Versuchspersonen sein. Im Gegensatz zu dieser Hypothese profitierten aber die Visualisierer nicht von der Animationsversion, sondern von den stehenden Bildern. In dieser Untersuchung war ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen dem Faktor Experimentalgruppe (Standbild, Animation) und der Lernpräferenz (Verbalisierer, Visualisierer) für die abhängigen Variablen *Lernzuwachs gesamt* und *Zuwachs Verständnis* festzustellen: die Verbalisierer profitierten dabei entgegen der Annahme von den animierten Darstellungen, während sich die Standbildversion für die Visualisierer als vorteilhafter erwies. Offensichtlich kann die externe Präsentation eines Prozesses durch eine Animation auch für Verbalisierer hilfreich sein, eine adäquate mentale Repräsentation dieses Prozesses zu generieren. Diesem Ergebnis entsprechend könnten Animationen eine kompensatorisches Gegengewicht für Lerner darstellen, deren visuelle Fähigkeiten weniger gut ausgeprägt sind (Salomon, 1979). Solange es keine eindeutigen Hinweise auf das unterschiedliche Lernverhalten oder verschiedene kognitive Strategien bei Verbalisierern und Visualisierern gibt, sollten daher diese Aspekte auch weiterhin bei nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

5.2 Die Wirkung von Simulationen im Vergleich zur animierten Lernumgebung

Hypothese 5 befasst sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit der Animation im Vergleich zur Simulation. Dabei wurde angenommen, dass interaktive Animationen, also Simulationen mit Parameterwahl, das tiefere Verständnis von biologischen Prozessen im Vergleich zu rein animierten Darstellungen ohne die Auswahloptionen stärker fördern.

Die varianzanalytischen Ergebnisse zeigen eine Überlegenheit der Simulationsgruppen an, die aber im Wesentlichen auf die Wirksamkeit einer einzigen Version, nämlich diejenige der Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung (Simulation 1), zurückzuführen ist. In diesem Fall fällt der Unterschied zwischen Simulation und animierter Darstellung signifikant aus. Die Zuwächse in den abhängigen Variablen beziehen sich bei den betrachteten Versuchsgruppen nur auf den *Lernzuwachs gesamt* und den Zuwachs im Faktenwissen. Die Unterschiede in der Verständnisleistung sind dagegen minimal und unterscheiden sich deshalb auch nicht signifikant. Dieses Ergebnis wird in differenzierterer Weise von der klassifizierenden Testauswertung bestätigt. Während Animation und Simulation für den Erwerb von reinem Faktenwissen gleich gut geeignet sind, gelingt deutlich mehr Versuchspersonen der Wechsel in die Könner-Klasse, wenn sie einer Simulationsgruppe angehörten.

In ihrer Gesamtheit zeigen diese Ergebnisse, dass sich die Lernprogramme Animation und Simulation gleich gut für den Erwerb von reinem Faktenwissen (gemäß dem Itemprofil der Klasse „Fakten“) eignen. Bezogen auf den Erwerb von prozessbezogenem Faktenwissen und Verständnis bezüglich der Kausalzusammenhänge der Primärreaktionen an der Thylakoidmembran unterscheiden sich die Lernumgebungen in ihrer Wirksamkeit voneinander; die Simulationen begünstigen den Erwerb dieses Faktenwissens und des Verständnis deutlicher als die Animation. Die Ergebnisse können damit nicht als Bestätigung der Hypothese 5 interpretiert werden, da in dieser Hypothese die Förderung des Verständnisses der kausalen Zusammenhänge für einen komplexen biologischen Lerngegenstand durch Simulationen postuliert wurde.

Als mögliche Ursache für den insgesamt gering ausfallenden Zuwachs im Verständnis kommen abermals die Vorwissensdefizite in Betracht, aufgrund derer die Versuchspersonen im Rahmen der Lernsituation vorwiegend Faktenwissen erworben haben. Selbst wenn die Probanden in die Könner-Klasse wechseln, wird anhand des Itemprofils dieser latenten Klasse deutlich, dass die Verständnisleistung dieser Gruppe begrenzt ist.

5.3 Die Wirkung von instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit Simulationen

Die beiden letzten Hypothesen befassen sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von Simulationen. Dabei wird zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen, die beim Lernen mit Simulationen Verwendung finden, eine Verbesserung der verständnisfördernden Wirkung der Simulationen zugeschrieben. Von diesen instruktionalen Hilfestellungen wird ferner angenommen, dass sie besonders Personen mit geringem Vorwissen zugute kommen (Hypothese 6a). Ferner wird erwartet, dass sich instruktionale Hilfestellungen reduzierend auf die kognitive Belastung beim Arbeiten mit Simulationen auswirken werden. Auch unter diesem Aspekt sollten sich die instruktionalen Hilfestellungen für Personen mit geringem Vorwissen stärker auswirken (Hypothese 6b).

Die sich bereits in der obigen Betrachtung abzeichnende Überlegenheit der Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen (Simulation 1) wird bei einem ausschließlichen Vergleich der drei Simulationsgruppen abermals bestätigt. Auch gegenüber den anderen beiden Simulationsgruppen, die mit unterschiedlichen zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen ausgestattet waren, erweist sich die Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen als deutlich wirksamer. Nach der inferenzstatistischen Auswertung werden die Unterschiede jedoch wiederum nur für den *Lernzuwachs gesamt* sowie für den *Zuwachs Faktenwissen* signifikant.

Die Wirksamkeit der instruktionalen Hilfestellungen kann unter zusätzlicher Berücksichtigung des Vorwissens weiter differenziert werden. Bei der varianzanalytischen Auswertung deutet sich ein Interaktionseffekt zwischen der Lernumgebung und dem themenspezifischen Vorwissen an, der allerdings nicht das Signifikanzniveau erreicht. Hiernach profitieren Personen mit hohem themenspezifischem Vorwissen von den zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen der Simulationen 2 und 3, während sich die Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen (Simulation 1) für Personen mit geringem Vorwissen als vorteilhafter für den Erwerb von Verständnis erweist. Im Einzelvergleich der Simulationsgruppen wird darüber hinaus deutlich, dass sich das Lernergebnis bei Personen mit geringem Vorwissen mit zunehmendem Grad an instruktionaler Unterstützung verschlechtert. Bei Personen mit hohem Vorwissen kann jedoch der gegenläufige Effekt beobachtet werden: je stärker Personen mit Vorwissen instruktional unterstützt werden, desto bessere Ergebnisse werden in der abhängigen Variable *Zuwachs Verständnis* erzielt. Diese Befunde stehen überraschenderweise nicht im Einklang mit der klassifizierenden Testauswertung. Die Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen begünstigen nach diesem Auswertungsverfahren den Erwerb von reinem Faktenwissen

gemäß des Itemprofils der Klasse „Fakten“ bei Personen mit geringem Vorwissen. Die Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen fördert Faktenwissen und Verständnis gemäß des Itemprofils der Klasse „Können“. Diese Lernumgebung erweist sich dann aber sowohl für Personen mit geringem Vorwissen als auch für Personen mit Vorwissen als wirksamer im Hinblick auf diesen Klassenwechsel. Personen mit Vorwissen gelingt der Klassenwechsel im Verhältnis allgemein häufiger als Personen mit geringem Vorwissen. Diese gegenläufigen Tendenzen der beiden Auswertungen könnten methodisch darin begründet sein, dass die Clusteranalyse im Falle der Simulationsgruppe mit minimalen Instruktionen eine Stichprobe mit hohem Vorwissen ergeben hat, die nur aus zwei Versuchspersonen besteht. Bei größerer Personenanzahl in dieser Stichprobe wären die beobachteten Effekt vermutlich einheitlich gewesen.

Insgesamt kann eine verständnisfördernde Wirkung von Simulationen mit Instruktionen insbesondere für Personen mit geringem Vorwissen anhand dieser Stichprobe nicht bestätigt werden. Diese Ergebnisse stehen damit in einem deutlichen Gegensatz zur Hypothese 6a. In dieser Hypothese wurde postuliert, dass sich zusätzliche instruktionale Hilfestellungen insgesamt positiv auf das Verständnis beim Arbeiten mit komplexen Lernumgebungen wie Simulationen auswirken würden und dies insbesondere bei Personen mit geringem Vorwissen.

Aus den Resultaten könnte daher folgen, dass die ausgewählten und in dieser Studie eingesetzten instruktionalen Hilfestellungen, die über das Minimum in Form von Aufgaben und Lernkontrollfragen hinausgehen, den Lernerfolg nicht weiter steigern, sondern ihn vielmehr wieder hemmen. Aufgaben sind demnach ausreichend, dem Lerner die Lernziele in einer Lernumgebung transparent zu machen. Lernkontrollfragen initiieren ein selbstreguliertes Lernen und geben darüber hinaus dem Lernenden die Möglichkeit, seinen Lernerfolg zu kontrollieren. Weitere instruktionale Unterstützungen, wie sie in den Simulationen 2 und 3 darüber hinaus angeboten wurden, hatten damit keinen positiven Effekt.

Eine andere Erklärung für die schlechte Wirksamkeit der zusätzlichen instruktionalen Unterstützungen bietet die Betrachtung der Einflussgröße *Kognitive Belastung*. Arbeiten der letzten Jahren im Rahmen der Multimediaforschung zeigten, dass das Lernen mit Simulationen zu einer starken kognitiven Belastung bei den Lernenden führen kann (Schnotz 1998, 1999). Weitere Befunde deuten daraufhin, dass die *kognitive Belastung* durch zusätzliche instruktionale Unterstützung reduziert werden kann (Leutner, 1993). Besonders Personen mit geringen themenspezifischen Vorkenntnissen sollten von solchen Hilfestellungen im Hinblick auf die kognitive Belastung und das Lernergebnis profitieren.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung können diese Befunde allerdings nicht stützen: hiernach werden die Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Unterstützung stets als kognitiv belastender eingeschätzt als die Simulation mit minimaler instruktionaler Unterstützung und zwar unabhängig vom Vorwissen der Versuchspersonen. Je größer die kognitive Belastung ist, desto geringere Lernleistungen werden im allgemeinen von den Versuchspersonen erbracht. Diese signifikant negative Korrelation zwischen der subjektiv wahrgenommenen Belastung und der Verständnisleistung legt die Vermutung nahe, dass hier ein Kausalzusammenhang existiert. Aufgrund dieser Ergebnisse muss die Hypothese 6b verworfen werden, welche eine kognitive Entlastung von Personen mit geringem Vorwissen durch instruktionale Hilfestellungen postulierte.

Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die bildlichen Darstellungen an der Thylakoidmembran in Kombination mit den einleitenden kurzen Erklärungen in der Simulation mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen hinreichend waren, um bei den Versuchspersonen ein Verständnis der Prozesse an der Thylakoidmembran anzubahnen, so dass auf die zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen in der Simulation 2 und Simulation 3 hätte verzichtet werden können. Sweller und seine Kollegen sprechen im Rahmen der „Cognitive Load Theory“ (Chandler & Sweller, 1991) vom „redundancy effect“, wenn selbsterklärende Grafiken, in der vorliegenden Studie selbsterklärende Animationen, zusätzlich in einem Erläuterungstext versehen werden. Auch konnten sie bei physischer Aktivität am Computer die Redundanz einer zusätzlichen Bedienungsanleitung zum Computerprogramm nachweisen (Cerpa, Chandler & Sweller, 1996; Chandler & Sweller, 1996; Sweller & Chandler, 1994). Der „redundancy effect“ kann sich durchaus negativ auf den Lernprozess auswirken. Diese contraintuitiven Ergebnisse erklärt die „Cognitive Load Theory“ durch eine zusätzliche und unangemessene Belastung des Arbeitsgedächtnisses mit der redundanten Information, die im schlechtesten Fall zu einer kognitiven Überlastung führt. Mayer formulierte nach seinen Untersuchungen das „Kohärenzprinzip“ (Mayer et al., 1996), das der Vermeidung redundanter Informationen Rechnung trägt. Danach sollte bei der Gestaltung multimedialer Lernumgebungen darauf geachtet werden, möglichst wenig Worte und Bilder zur Erklärung eines Sachverhalts zu verwenden.

Des Weiteren sind die Vorgänge an der Thylakoidmembran, insbesondere die hier thematisierten Primärreaktionen der Fotosynthese, ein ausgesprochen komplexer Lerngegenstand. Diese Vorgänge adäquat verstehen zu können, erfordert ein erhöhtes Maß an Kenntnis physiologischer und biochemischer Konzepte. Die Versuchspersonen gehörten zur 11. Jahrgangsstufe und verfügten daher möglicherweise mehrheitlich nicht über diese konzeptuellen Vorrassetzungen. Belegt wurde diese Annahme durch die Clusteranalyse zur Differenzierung der beiden Gruppen mit unterschiedlich großem themenspezifischen Vorwissen. Nur wenige der Schülerinnen und Schüler verfügten über Faktenwissen zu den

Primärreaktionen der Fotosynthese und damit über ein gewisses Maß an Vorwissen. Dieses Ergebnis wurde zusätzlich von der klassifizierenden Testauswertung untermauert. Infolge des Vorwissensdefizit bemühte sich die Mehrheit der Stichprobe zunächst um eine adäquate Wissensbasis für den Verstehensprozess. Das tiefere Verständnis der komplexen biologischen Prozesse selbst wird daraufhin nicht erreicht, was sich in den insgesamt geringen Lernergebnisse in dieser abhängigen Variable bzw. an den Itemprofilen der latenten Klassen des klassifizierenden Testmodells widerspiegelt.

5.4 Vorwissen und Lernerfolg

In dieser Studie wurde analog zur Studie 2 die Wirkung von Animation und Simulation auf das Verständnis eines komplexen biologischen Lerngegenstandes untersucht, wobei dem Vorwissen eine moderierende Rolle im Hinblick auf den Lernerfolg zugeschrieben wurde. Aus diesem Grund soll das Vorwissen der Stichprobe noch einmal separat für die gesamte Stichprobe auf der Basis der deskriptiven Statistik und der Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung diskutiert werden. Die Höhe und Art des themenspezifischen Vorwissens wird darüber hinaus Rückschlüsse auf die Quantität und Qualität des Lernerfolgs zulassen.

Das *themenspezifische Vorwissen* bezüglich der Primärreaktionen der Fotosynthese, das bei der varianzanalytischen Auswertung durch den Summenscore der Faktenwissenitems im Vortest operationalisiert wurde, ist bereits auf Basis der deskriptiven Statistik in der Gesamtstichprobe als gering einzustufen. Durch die Clusteranalyse wurden zwei Gruppen mit unterschiedlich hohem Vorwissen eingeteilt. Die Gruppe mit hohem Vorwissen umfasste lediglich 32 von 150 Versuchspersonen. Die klassifizierende Testauswertung ergab weiteren Aufschluss bezüglich des Vorwissensstandes der Stichprobe. Die *qualitativen Unterschiede* im Vorwissen manifestieren sich in den Itemprofilen der drei latenten Klassen. Diese drei Klassen unterscheiden sich stark in der Art ihres Faktenwissen, nicht so sehr dagegen in der Kategorie Verständnis. Bezüglich der Lösungswahrscheinlichkeiten der Verständnisitems sind die Itemprofile der Klassen „Nicht-Köner“ und „Fakten“ nahezu identisch, während sich nur die Klasse „Köner“ in der Höhe dieser Lösungswahrscheinlichkeiten unterscheidet. Die Zuordnung der Versuchspersonen zu den drei latenten Klassen „Nicht-Köner“, „Fakten“ und „Köner“ basierend auf ihrem Vortestergebnis zeigt, dass die Stichprobe hinsichtlich ihres Vorwissens relativ homogen ist. Von den 150 werden lediglich 25 Versuchspersonen in die Klasse „Fakten“ und 9 Versuchspersonen in die Klasse „Köner“ nach ihrem Vortestergebnis eingeordnet. Somit verfügen über 75% der Stichprobe über keinerlei themenspezifisches Vorwissen. Daraus resultieren innerhalb der Experimentalgruppen relativ kleine Gruppen von Personen mit hohem Vorwissen, was Vergleiche zwischen den Vorwissensgruppen, ihre

zuverlässige Interpretation und eine Verallgemeinerung dieser Ergebnisse problematisch macht oder sogar unzulässig erscheinen lässt.

In unmittelbarem Zusammenhang mit den mehrheitlich geringen Vorkenntnissen ist die *Quantität und die Qualität des Lernerfolgs* zu sehen. Die deskriptive Statistik weist für die Gesamtstichprobe (unabhängig vom Vorwissen) einen *Lernzuwachs gesamt* auf, der zu über 80% auf den Zuwachs in der Kategorie Faktenwissen zurückzuführen ist. Die Stichprobe lernte also vermehrt Faktenwissen. Im Verständnis wurden dagegen nur geringe Zuwächse erzielt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verständnisitems für die Stichprobe aufgrund ihres geringen Vorwissensstandes auch nach der Lernsitzung noch zu schwer waren.

Im Hinblick auf die Art des Lernerfolgs kann die klassifizierende Testauswertung ein differenzierteres Bild liefern als dies durch deskriptiven Statistiken der Kategorien Faktenwissen und Verständnis möglich war. Durch die Itemprofile der latenten Klassen kann analog zum *themenspezifischen Vorwissen* (s.o.) auch die *Qualität des Lernerfolgs* der Stichprobe nach der Lernsitzung diskutiert werden. Der Klasse „Fakten“ ist die Summengleichung der Fotosynthese und der Gesamtvorgang in groben Zügen offenbar bekannt. Im Gegensatz dazu werden Faktenwissenitems, die nähere Kenntnisse zum räumlichen Bau der Thylakoidmembran und Details zur Sequenzierung des Ablaufs erfordern, in dieser Klasse mit geringer Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet. Alle Verständnisitems werden ebenso mit nur geringen Wahrscheinlichkeiten korrekt beantwortet. Erst die Klasse „Könner“ verfügt neben einem sicheren Faktenwissen über die Vorgänge an der Thylakoidmembran, das neben der Kenntnis der stöchiometrischen Verhältnisse auch nähere Kenntnisse zum räumlichen Bau der Thylakoidmembran und zu den Details der Sequenzierung des Ablaufs einschließt, über ein gewisses Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Lichtanregung der Photosysteme, Elektronentransport, Protonentransport und ATP-Synthese. Auch wenn die Lösungswahrscheinlichkeiten in dieser Klasse am größten sind, so darf man nicht übersehen, dass die Verständnisitems mehrheitlich auch von dieser Klasse nur mit geringen bis mittleren Wahrscheinlichkeiten richtig gelöst werden. Da sich die Klassen dann vorwiegend in der Lösungswahrscheinlichkeit der Faktenwissenitems unterscheiden, nicht so sehr dagegen in den Lösungswahrscheinlichkeiten der Verständnisitems, bedeutet dies für den Lernerfolg, dass er vorwiegend auf dem Erwerb von Faktenwissen beruht, und zwar unabhängig davon, ob eine Versuchsperson auf der Basis ihres Nachtestergebnisses in die Klasse „Fakten“ oder die Klasse „Könner“ wechselt.

Die Befunde der klassifizierenden Testauswertung bestätigen damit in differenzierterer Weise die Ergebnisse der deskriptiven Statistik, in denen sich bereits andeutete, dass die Gesamtstichprobe vorwiegend Faktenwissen erwirbt. Die Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung machen ferner deutlich, dass die Verständnisitems die latenten Klassen nicht so klar trennen wie dies für die Faktenwissenitems der Fall ist. An den geringen Trennschärfen der Items, die zudem mit Zufallswahrscheinlichkeit richtig beantwortet werden, kann festgemacht werden, dass Verständnisitems für den Vorwissensstand der Personen zu schwer waren, wie dies bereits nach der deskriptiven Statistik vermutet wurde. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Stichprobe nur geringe Unterschiede in ihrem Vorwissen aufwies, das auf einem insgesamt eher niedrigen Niveau angesiedelt war. Deshalb erwarb die Stichprobe in der Lernsitzung vorwiegend Faktenwissen, um das bestehende Vorwissensdefizit zu kompensieren und eine Wissensbasis für ein tieferes Verständnis zu schaffen. Die Verständnisitems waren für die Versuchspersonen auch nach der computergestützten Lernsitzung noch zu schwierig zu beantworten, so dass ein deutlicher Lernerfolg in der Kategorie Verständnis nicht nachgewiesen werden konnte. Aus diesem Grund waren Unterschiede in der Lernwirksamkeit der Treatments in dieser Studie nur ansatzweise aufzuzeigen.

VIII VERGLEICH DER STUDIEN 2 & 3

In den Studien 2 (Atmungskette) & 3 (Fotosynthese) wurde die Wirksamkeit der unterschiedlicher computergestützter Lernumgebungen wie Animation und Simulation auf das Erlernen komplexer stoffwechselphysiologischer Vorgänge am Beispiel der Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran und den Primärreaktionen der Fotosynthese an der Thylakoidmembran untersucht. Es sollte geklärt werden, inwiefern Animation und Simulation dazu geeignet sind, das Verständnis dieser komplexen Lerngegenstände zu fördern. Es wurde weiterhin vermutet, dass die lernerspezifischen Merkmale „Vorwissen“ und „Lernpräferenz“ das Lernergebnis beeinflussen. Daher wurden diese moderierenden Variablen mit ihrem Einfluss auf den Lernerfolg zusätzlich kontrolliert.

Im letzten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden nun alle Ergebnisse der beiden hypothesenprüfenden Studien diskutiert. Hierbei werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Befunden der Studie 2 und der Studie 3 aufgezeigt und vor dem theoretischen Hintergrund der Multimediaforschung erörtert. Damit wird gezeigt, inwieweit sich die positiven Wirkungen von Animation und Simulation für die stoffwechselphysiologischen Lerninhalte „Atmungskette“ und „Fotosynthese“ replizieren lassen.

Im Abschnitt 1, *Zusammenfassung der Forschungsergebnisse*, werden alle Untersuchungsergebnisse tabellarisch zusammengefasst und im Hinblick auf die Forschungshypothesen vergleichend bewertet. Der Abschnitt 2, *Vergleichende Diskussion der Befunde*, befasst sich dann mit der Erörterung des in Abschnitt 1 angestellten Vergleichs. Im Abschnitt 3, *Ausblick*, werden abschließend noch offene Fragen zusammengestellt und einige Ideen entwickelt, welche Ansätze bei der künftigen Multimedia-Forschung im biologiedidaktischen Bereich sinnvoll verfolgt werden könnten.

1 ZUSAMMENFASSUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE

Tabelle VIII-1: Zusammenfassende und vergleichende Darstellung der Untersuchungsergebnisse aus Studie 2 (Atmungskette) und Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese)

Hypothese	Studie 2 (VA)	Studie 2 (LCA)	Studie 3 (VA)	Studie 3 (LCA)
(1) Animationen in Kombination mit Texten sind besser als stehende Bilder mit Texten dazu geeignet, den Lernerfolg im Hinblick auf biologische Prozesse zu fördern.	+/-	+	-	+
(2) Die spezifische lernförderliche Wirkung der Animation beschränkt sich auf das Verständnis. Das Faktenwissen wird im Vergleich zum Lernen mit stehenden Bildern nicht verbessert.	-	+	-	-
(3) Die verständnisfördernde Wirkung der Animation lässt sich nur für Schülerinnen und Schüler mit geringem themenspezifischen Vorwissen nachweisen. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen lernen mit stehenden Bildern genauso gut.	-		-	-
(4) Die verständnisfördernde Wirkung der nicht interaktiven Animation lässt sich nur für Visualisierer nachweisen. Verbalisierer lernen mit Texten und stehenden Bildern ebenso gut wie mit Texten und Animationen.	-		-	
(5) Simulationen (interaktive Animationen) fördern das Verständnis für kausale Zusammenhänge in einem komplexen System besser als Animationen ohne Interaktivität.	-	+	+/-	+
(6a) Instruktionale Hilfestellungen verbessern die verständnisfördernde Wirkung einer Animation mit einstellbaren Parametern. Bei Lernenden mit höherem Vorwissen wirken sich diese zusätzlichen instruktionalen Maßnahmen weniger deutlich aus.	-	-	-	-
(6b) Instruktionale Hilfestellungen vermindern die Gefahr einer kognitiven Überlastung. Bei Lernenden mit höherem Vorwissen wirken sich diese zusätzlichen instruktionalen Maßnahmen weniger deutlich aus.	-		-	

Zeichenerklärung: - Hypothesenwidriges Ergebnis
 +/- Teilweise hypothesenkonformes Ergebnis, Tendenz
 + Hypothesenbestätigendes Ergebnis

2 VERGLEICHENDE DISKUSSION DER BEFUNDE

Dieser Abschnitt dient dazu, alle vorliegenden Ergebnisse der Studie 2 (Atmungskette) und der Studie 3 (Fotosynthese) auf der Basis der obigen Zusammenstellung vergleichend miteinander zu diskutieren und Verknüpfungen zwischen den Einzelbefunden der beiden Untersuchungen mit ihren jeweils zwei Auswertungsverfahren herzustellen. Dabei wird so vorgegangen, dass zunächst immer die auf die Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung im Hinblick auf die Hypothesen Bezug genommen wird. Im Anschluss daran werden die Erkenntnisse der probabilistischen Auswertung – sofern sich hierdurch weitere Aufschlüsse ergeben – mit in die Diskussion einbezogen. Darüber hinaus werden die empirischen Ergebnisse dieser beiden Studien mit den im theoretischen Teil geschilderten Befunden aus anderen Studien verglichen.

2.1 Wirksamkeit stehender Bilder und Animation

Der erste Hypothesenkomplex befasst sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von stehenden Bildern und Animationen. Dabei wird der Animation in Kombination mit Texten eine größere Wirksamkeit im Hinblick auf den Lernerfolg bei biologischen Prozessen zugeschrieben (Hypothese 1). Ferner wird erwartet, dass sich die spezifisch lernförderliche Wirkung der Animation auf das Verständnis beschränkt, wobei das Faktenwissen im Vergleich zum Lernen mit stehenden Bildern nicht verbessert werde (Hypothese 2). Bei Berücksichtigung der individuellen Lernermerkmale wird vermutet, dass sich die verständnisfördernde Wirkung der Animation vorwiegend bei Personen mit geringem Vorwissen einerseits (Hypothese 3) und andererseits bei Personen mit visueller Lernpräferenz, den Visualisierern, (Hypothese 4) entfaltet.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern im Hinblick auf den *Lernzuwachs* *gesamt* und differenziert nach der Lernleistung in die Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis*

In den beiden Studien zeigten sich beim Vergleich des *Lernzuwachs* *gesamt* zwischen den beiden jeweiligen Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ Unterschiede. Diese sind jedoch nicht einheitlich und auch nicht erwartungsgemäß: während zwar in der Studie 2 die Experimentalgruppe „Animation“ die besseren Lernzuwächse erzielte, waren es in der Studie 3 die Versuchspersonen der Experimentalgruppe „Standbild“. Keines dieser beiden Resultate erreichte jedoch das Signifikanzniveau. Diese beiden uneinheitlichen Befunde sind insofern bemerkenswert, da gerade die Standbild- und die Animationsversion in den beiden

Studien von den zu vermittelnden stoffwechselphysiologischen Inhalten abgesehen in der optischen Präsentation nahezu identisch gestaltet waren. Hierbei wurde insbesondere das Kontiguitätsprinzip bei der Gestaltung der Lernumgebungen berücksichtigt, das auf der gleichzeitigen Präsentation von zusammengehörigen Text-Bild-Einheiten beruht und sich in verschiedenen Studien als verständnisfördernd erwiesen hatte (Mayer & Anderson, 1991, 1992; Mayer & Sims, 1994). Infolgedessen hätte erwartet werden können, dass sich in beiden Studien die Animationsversion als die lernförderliche erweist, da sie die jeweils relevanten Lerninhalte von Elektronen- und Protonentransport an der inneren Mitochondrienmembran bzw. an der Thylakoidmembran des Chloroplasten in einer wesentlich vollständigeren Weise darstellen, als dies mit stehenden Bildern in beiden Fällen möglich sein kann. Dieser gegenläufige Effekt in den beiden Studien legt die Vermutung nahe, dass die Verwendung von Pfeilen als Bewegungsindikatoren den Schülerinnen und Schülern aus Schulbüchern hinreichend vertraut ist und dass diese Art der Darstellung auch bei komplexen Lerngegenständen zu ähnlich guten oder sogar zu besseren Lernergebnissen führen kann (Lewalter, 1997).

Auch die weitere Differenzierung der Lernleistung in die Zuwächse in den Kategorien Faktenwissen und Verständnis lassen keine eindeutigen Aussagen zur Lernwirksamkeit von Animation und stehenden Bildern für einen komplexen biologischen Lerninhalt zu. Zwar findet man in beiden Studien eine geringe nicht signifikante Überlegenheit der Animationsversion für den Erwerb von Faktenwissen, jedoch sind die Ergebnisse im Hinblick auf das Verständnis wiederum uneinheitlich: bei der Studie 2 (Atmungskette) profitieren Personen der Experimentalgruppe „Animation“, bei der Studie 3 (Fotosynthese) die Schülerinnen und Schüler der Experimentalgruppe (Standbild). Aus den Resultaten dieser beiden Studien dürfte demnach nur gefolgert werden, dass die bisherigen Erkenntnisse über die positive Wirkung von Animationen (Mayer & Anderson, 1991; Rieber & Kini, 1991) für das Verständnis nicht ohne weiteres auf das Erlernen von komplexen biologischen Prozessen übertragbar sind. Im Hinblick auf den ebenso erfolgreichen Einsatz der Standbildversion ließe sich mit der gleichen Berechtigung anführen, dass Animationen möglicherweise beim Erlernen von komplexen biologischen Prozessen die Aufmerksamkeit des Lernenden beeinträchtigen oder darüber hinaus kognitive Strategien anregen, die weniger dazu geeignet sind, ein tieferes Verständnis der Vorgänge zu initiieren (Lewalter, 1997; Salomon, 1984). Denn sollten Animationen tatsächlich aufgrund ihrer vollständigeren Darstellung und der geringeren Abstraktion zu einem tieferen Verständnis beitragen (Rieber & Kini, 1991), hätten die Ergebnisse auch in diesen beiden Untersuchungen deutlicher zugunsten der Experimentalgruppe „Animation“ ausfallen müssen.

Die Ergebnisse der beiden Studien zeigen damit, dass in der schulischen Lernsituation der Einsatz von Animationen mit Lehrtexten weder hinsichtlich des *Lernzuwachs* *gesamt* noch hinsichtlich der Differenzierung nach seinen beiden Kategorien *Zuwachs Faktenwissen* und *Zuwachs Verständnis* zu deutlich besseren Lernleistungen führt als der Einsatz statischer Bilder. Die Hypothese 1 und die Hypothese 2 kann damit im Hinblick auf den Lernerfolg und auf das Verständnis für einen komplexen biologischen Lerngegenstand nicht bestätigt werden. Experimentell belegt wird damit lediglich die Vermutung, dass sich die beiden Lernumgebungen in Bezug auf den Erwerb von Faktenwissen nicht unterscheiden.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernervariable „Vorwissen“

Um den Einfluss des Vorwissens auf die in den beiden Studien erzielten Verständniszuwächse zu ermitteln, wurden zwei komplementäre Auswertungsverfahren auf die Datensätze der Studien 2 und 3 angewendet. Beim ersten Verfahren wurden die Versuchspersonen nach ihrem bereits vorhandenen Faktenwissen geclustert. Die beiden resultierenden Vorwissensgruppen wurden zusammen mit dem Faktor Experimentalgruppe (Standbild, Animation) einer zweifaktoriellen Varianzanalyse unterzogen. Dieses Verfahren ergab bei beiden Studien wiederum nicht signifikante und uneinheitliche Effekte. Während sich in der Studie 2 der postulierte Interaktionseffekt zwischen dem Vorwissen und der Experimentalgruppe andeutete, wirkt sich in der Studie 3 die Standbildversion unabhängig vom Vorwissen stets positiver auf den Verständniszuwachs aus, wobei Personen mit Vorwissen bessere Lernergebnisse erzielten als Personen ohne Vorwissen.

Aus diesen Ergebnissen kann zunächst nur abgeleitet werden, dass Animationen auch für komplexe biologischen Lerngegenstände eine kompensatorische Wirkung hinsichtlich der Vorwissensdefizite haben können. Durch die Resultate dieser beiden Studien werden lediglich die Befunde aus der Literatur bestätigt, wonach Personen mit größerem Vorwissen anhand illustrierter Lehrtexte ebenso gut ein tieferes Verständnis der erläuterten Sachverhalte aufbauen können (Lewalter, 1997; Mayer, 1997; Mayer & Gallini, 1990). Allgemeinen bleiben die Leistungsdifferenzen zwischen den Lernenden mit unterschiedlich großem Vorwissen aber in der Tendenz erhalten, so dass die Vorwissensdefizite also nicht durch die animierte Darstellung ausgeglichen werden. Auf der Basis dieser Resultate ist die Hypothese 3 daher zu verwerfen.

Zu berücksichtigen ist bei Aussagen zum Einfluss des Vorwissens auf den Verständniszuwachs, dass die Unterschiede der beiden Vorwissensgruppen innerhalb einer Experimentalgruppe in dieser abhängigen Variable nur sehr gering sind. Ferner ergaben die Clusteranalysen lediglich kleine Gruppen von Personen mit Vorwissen auf der Basis bereits vorhandenen Faktenwissens. Nimmt man in beiden Studien eine Stichprobe an, die hinsichtlich ihres Vorwissen eher homogen und dieses auf niedrigem Niveau anzusiedeln ist, so kann anhand dieser Ergebnisse gefolgert werden, dass sowohl die stehenden Bilder als auch die Animationen eine Wirkung auf die Verständnisleistung entfalten. Aus dieser Sichtweise betrachtet, stehen diese Befunde im Einklang mit Untersuchungen anderer Autoren (Lewalter, 1997; Mayer & Gallini, 1990; Mayer et al., 1995).

Dass sich die verständnisfördernde Wirkung der bildlichen Darstellung nur gering entfaltetete, könnte auch darauf zurückzuführen sein, dass ein wichtiges Prinzip bei der Gestaltung der multimedialen Lernumgebungen aus Gründen der ökologischen Validität verletzt werden musste: die Lehrtexte wurden in Form geschriebener On-Screen-Texte in die Lernumgebung eingebettet, statt sie als Erzählungen auditiv zu präsentieren. Dies führt nach Sweller und anderen (Chandler & Sweller, 1991; Mousavi, Low, & Sweller, 1995) zu einem sogenannten Split-Attention-Effect, der sich im allgemeinen negativ auf die Verständnisleistungen auswirkt (Mayer & Moreno, 1998). Da Personen mit geringem Vorwissen stärker auf die Verletzungen der wesentlichen multimedialen Gestaltungsprinzipien ansprechen (Mayer et al., 1995), könnte hierin der geringe Verständniszuwachs dieser Stichprobe begründet liegen. Aus Gründen der ökologischen Validität war eine Kombination von Bild bzw. Animation mit narrativem Text jedoch nicht zu verwirklichen. Einige Computerräume derjenigen Schulen, die an den Studien 2 und 3 teilgenommen hatten, verfügten nicht über die notwendige Ausstattung an Soundkarten in den Rechnern und den dazugehörigen Kopfhörern. Damit die Untersuchungsbedingungen für alle teilnehmenden Schulen gleichgestaltet waren, wurden daher die Lehrtexte zusammen mit den verschiedenen bildlichen Darstellungen On-Screen gezeigt.

Aussagen über die Wirkung der Experimentalgruppen Animation und Standbild sind also aufgrund des geringen Vorwissens und hinsichtlich der geringen Verständnisleistung nur wenig zufriedenstellend. Das zweite Auswertungsverfahren, die Latente Klassennanalyse, sollte daher weiteren Aufschluss über die Wirksamkeit dieser beiden Lernumgebungen unter Berücksichtigung des Vorwissens auf den Lernerfolg geben. Bei diesen Analysen sollten in erster Linie qualitative Aussagen über die Art von Vorwissen und die Art von Lernerfolg gemacht werden. Durch die vorgenommenen Modellierung kann exakt benannt werden, über *welches* Vorwissen ein Lernender verfügt und *was* er an Wissen darüber hinaus erwirbt. Dieses Verfahren eignet sich daher nur zur differenzierteren Bewertung der Hypothesen, wenn in ihnen der Focus auf einem Treatmentvergleich in Kombination mit Vorwissen und

Lernleistung liegt. Anhand dieser Ergebnisse könnten somit Einschränkungen für eine bestehende Hypothese vorgenommen werden, die dann im Rahmen einer neuen Untersuchung zu überprüfen wären.

Allgemein ergab das zweite Auswertungsverfahren für die Studien 2 und 3 konkrete Hinweise darauf, dass es nur sehr wenige Personen mit themenspezifischem Vorwissen in beiden Untersuchungen gab. In der Studie 2 waren lediglich fünf Personen mit themenspezifisches Vorwissen vorhanden. Dies ist u.U. darauf zurückzuführen, dass die computergestützte Lernsitzung von den Lehrkräften zur Einführung in das Thema genutzt wurde. In der Studie 3 ist die Vorwissensbasis geringfügig breiter. Hier gibt es einige Versuchspersonen, die über Vorwissen in Form von definiertem Faktenwissen verfügen. Dies mag daran liegen, dass die Fotosynthese von den Lehrkräften als Themenschwerpunkt im zweiten Schulhalbjahr der 11. Jahrgangsstufe ausgewählt wurde und infolgedessen zum Zeitpunkt der computergestützten Lernsitzung bereits erschöpfender behandelt worden war.

Die angesprochenen Vorwissensdefizite bewirken jedenfalls in beiden Studien, dass von den Versuchspersonen vorwiegend Faktenwissen zu dem jeweiligen Themengebieten der Studien 2 und 3 erworben wurde. Tieferes Verständnis für die Vorgänge an innerer Mitochondrienmembran und an der Thylakoidmembran in Chloroplasten wird dadurch von den Versuchspersonen nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit erreicht. Bemerkenswert dabei ist, dass der relative Anteil der Personen, die in Studie 2 einen Lernerfolg in Faktenwissen und Verständnis mit Standbild- und Animationsversion verzeichnen können, ungefähr doppelt so groß ist wie dieser Anteil in Studie 3.

Aus kognitiver Sicht könnte dieser Aspekt so zu erklären sein, dass das die Aufbereitung des Themas der Studie 3 (Fotosynthese) im Unterricht zu Interferenzen mit der Darstellungen dieses Lerninhalts in den computergestützten Lernumgebungen geführt hat. Der bereits behandelte Stoff war offenbar gedanklich so wenig bei den Versuchspersonen durchdrungen, dass die neuen Aspekte dieses Themas nicht effizient mit dem bereits vorhandenen Wissen vernetzt werden konnte. Damit könnte sich auch in dieser Studie abzeichnen, dass das im naturwissenschaftliche Unterricht vermittelte Wissen im Hinblick auf komplexe Lerngegenstände nicht anschlussfähig gewesen ist (vgl. hierzu Baumert & Bos, 1998; Baumert et al., 2001). Möglicherweise ist der geringere Lernerfolg in der Studie 3 auch auf Verstehensillusionen im vorangegangenen Biologieunterricht zurückzuführen, der die Versuchspersonen die in der Studie verwendeten Lernprogramme nur oberflächlich hat bearbeiten lassen. Durch die oberflächliche Bearbeitung wurde dann kein Lernerfolg bzw. ein tieferes Verständnis der Lerninhalte erreicht.

Ferner könnte sich eine vorangegangene Behandlung der Primärreaktionen der Fotosynthese im Biologieunterricht bei den Versuchspersonen u.U. auch negativ auf ihre Lernmotivation in der computergestützten Lernsituation ausgewirkt haben. Da das Thema Atmungskette im Unterricht zuvor vermutlich nicht angesprochen worden war, bestanden die genannten Probleme in der Studie 2 nicht in dem Maße.

Gemessen an den gravierenden Unterschieden im Lernerfolg zwischen den beiden Studien erscheinen die Differenzen in der Wirksamkeit zwischen den Lernumgebungen Standbild und Animation nur geringfügig. Auch bei der Anwendung der latenten Klassenanalyse auf die Daten zeichneten sich für die Treatments keine einheitlichen Effekte ab. Durch die Animationsversion erreichen nur dann mehr Versuchspersonen in beiden Studien im Vergleich zur Standbildversion einen Lernerfolg, wenn man die Differenzierung des Lernerfolgs in „Erwerb von Faktenwissen“ bzw. in „Erwerb von Verständnis“ vernachlässigt.

Die varianzanalytischen Ergebnisse und die Ergebnisse der probabilistischen Analyseverfahren dieser beiden Studien zeigen damit, dass der Einsatz von Animationen mit Lehrtexten bei Personen mit geringem Vorwissen seine vermutete verständnisfördernde Wirkung in der schulischen Lernsituation aufgrund zu geringer themenspezifischer Kenntnisse bei den Versuchspersonen nicht entfalten konnte. Die Schülerrinnen und Schüler bauten zunächst entsprechend ihrem Vorwissensniveau themenspezifisches Faktenwissen und kein tiefergehendes Verständnis der Sachverhalte auf. Die Hypothese 3, die die verständnisfördernde Wirkung der animierten Lernumgebung für Personen mit geringem Vorwissen postulierte, kann somit anhand dieser beiden Studien weder widerlegt noch bestätigt werden, da die Stichprobe die notwendigen Voraussetzungen nicht erfüllte. Diese Hypothese wird daher im Rahmen einer weiteren Untersuchung erneut zu überprüfen sein.

Wirksamkeit von Animation und stehenden Bildern unter Berücksichtigung der Lernvariable „Lernpräferenz“

Um den Einfluss der Lernpräferenz auf die in den beiden Studien erzielten Verständniszuwächse zu ermitteln, wurden die Versuchspersonen zunächst in beiden Studien nach ihrer verbalen und visuellen Lernpräferenz geclustert. Im anschließenden Vergleich bezüglich des Zuwachses im Verständnis zeigten sich zwischen den beiden jeweiligen Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ auch dann Unterschiede, wenn die Lernpräferenz (Verbalisierer, Visualisierer) mitberücksichtigt wurde. Die beobachteten Effekte sind jedoch nicht einheitlich und auch nicht erwartungsgemäß: während in der Studie 2 die Experimentalgruppe „Animation“ stets überlegen ist (nicht signifikant) und die Visualisierer bessere Lernergebnisse im Verständnis erzielen als die Verbalisierer (ebenfalls nicht signifikant), wird in der Studie 3 der Interaktionseffekt zwischen den beiden Faktoren

der Varianzanalyse signifikant. Hierbei profitieren die Visualisierer für ihr Verständnis von der Standbildversion, während die Verbalisierer ein besseres Lernergebnis mit der animierten Darstellung erreichen.

Die positive Wirkung der bildhaften Darstellungen für Visualisierer war nach den Befunden von Plass und Koautoren (1998) zu erwarten. Er konnte am Beispiel des Fremdsprachenlernens zeigen, dass sich Worterklärungen in der jeweils bevorzugten Kodierungsform positiv auf das Textverständnis auswirkten. Dass auch Verbalisierer von den animierten Darstellungen stark profitieren können, lässt sich auf der Basis des Supplantationskonzepts von Salomon (1979) plausibel erklären. Danach könnte die externe Präsentation einer Bewegung im Rahmen eines komplexen Lerngegenstandes gerade Verbalisierern hilfreich sein, eine adäquate mentale Repräsentation dieses Prozesses zu generieren. Die Animation könnte dabei hinsichtlich der wenig ausgeprägten visuellen Fähigkeiten eines Verbalisierers ein kompensatorisches Gegengewicht hierzu darstellen. Damit ist die Hypothese 4 widerlegt, die die verständnisfördernde Wirkung von animierten Darstellungen ausschließlich für Visualisierer postulierte.

2.2 Wirksamkeit von Animation und Simulation

Hypothese 5 befasst sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit der Animation im Vergleich zur Simulation. Dabei wird der Simulation gemeinhin eine größere Wirksamkeit im Hinblick auf das Verständnis der kausalen Zusammenhänge bei biologischen Prozessen zugeschrieben. Der Vergleich der Analysen in den Studien 2 und 3 jeweils zwischen der Experimentalgruppe „Animation“ und der Gruppe „Simulationen“ im Hinblick auf die Zuwächse im Verständnis ergaben gegenläufige Tendenzen. In der Studie 2 lernten die Versuchspersonen mit den animierten Darstellungen signifikant besser als mit beiden Simulationen, während sich in der Studie 3 die Simulationen erwartungsgemäß verständnisfördernder auswirken als die animierte Darstellung. In der Studie 3 erreichten die Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen jedoch entgegen der Erwartung in der abhängigen Variable Verständnis nicht das Signifikanzniveau.

Die verständnisfördernde Wirkung von Simulationen, die ihnen basierend auf der aktiven Auseinandersetzung des Lernenden mit den kausalen Zusammenhängen des Systems zugeschrieben werden (Euler, 1994; Haack, 1995; Leutner, 1993; Schnotz et al., 1999; Schnotz et al., 1998), kann somit anhand dieser Studien für komplexe biologische Inhalte nicht allgemeingültig bestätigt werden, da sich die hier verwendeten Animationsversionen als nicht signifikant schlechter oder sogar als besser erwiesen haben. Dies könnte allgemein darauf zurückzuführen sein, dass die Stichprobe in beiden Untersuchungen über ein äußerst

geringes Vorwissen verfügte. Dies zeigen die Itemprofile der klassifizierenden Testauswertung in beiden Untersuchungen. Hieran wird deutlich, dass selbst in den Können-Klassen der beiden Studien die Verständnisitems mehrheitlich mit geringen und mittleren Wahrscheinlichkeiten richtig beantwortet werden. Ferner kann in der Studie 2 jeweils $\frac{1}{4}$ aller Versuchspersonen in den beiden Treatments ein tieferes Verständnis der Vorgänge an der inneren Mitochondrienmembran und ihrer Zusammenhänge erwerben. Im Rahmen der Studie 3 erreichen $\frac{1}{3}$ der Versuchspersonen mit geringem Vorwissen, aus denen die Gesamtstichprobe mehrheitlich besteht, nach der computergestützten Lernsitzung die Können-Klasse.

Ungeachtet der Treatments Animation und Simulation konnte den Versuchspersonen die computergestützte Lernsitzung offensichtlich nur dazu dienen, hinsichtlich der behandelten stoffwechselphysiologischen Prozesse eine Wissensbasis bestehend aus Faktenwissen aufzubauen. Ein tieferes Verständnis für die Prozesse und Kausalzusammenhänge an der inneren Mitochondrienmembran und der Thylakoidmembran im Chloroplasten wurde nicht erreicht. Eine differenziertere Betrachtung der verschiedenen Simulationstreatments im nächsten Abschnitt soll noch weiteren Aufschluss über ihre Wirksamkeit liefern. Hierbei wird ferner der Einfluss der kognitiven Belastung noch zu diskutieren sein.

2.3 Wirksamkeit von Simulation und instruktionaler Hilfestellung

Die beiden abschließenden Hypothesen befassen sich mit der Frage nach der Lernwirksamkeit von Simulationen. Dabei wird zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen, die beim Lernen mit Simulationen Verwendung finden, eine Verbesserung der verständnisfördernden Wirkung der Simulationen zugeschrieben. Von diesen instruktionalen Hilfestellungen wird angenommen, dass sie besonders Personen mit geringem Vorwissen zugute kommen (Hypothese 6a). Ferner wird erwartet, dass sich instruktionale Hilfestellungen reduzierend auf die kognitive Belastung beim Arbeiten mit Simulationen auswirken werden. Auch unter diesem Aspekt sollten sich die instruktionalen Hilfestellungen für Personen mit geringem Vorwissen stärker auswirken (Hypothese 6b).

In der Studie 2 besteht nach der varianzanalytischen Auswertung bezüglich der Verständnisleistung kein Unterschied zwischen den beiden Simulationsgruppen. Da die Stichprobe in dieser Studie hinsichtlich ihres Vorwissens nicht weiter differenziert werden kann, wirken sich die instruktionalen Hilfestellungen insbesondere für Personen mit geringem Vorwissen nicht verständnisfördernd aus. Die Studie 3 bestätigt diese Beobachtung im Hinblick auf die Wirksamkeit der instruktionalen Hilfestellungen beim Lernen mit

Simulationen für Personen mit geringem Vorwissen. Beim Einzelvergleich der Simulationsgruppen wurde in dieser Untersuchung deutlich, dass sich das Lernergebnis bei Personen mit geringem Vorwissen mit zunehmendem Grad an instruktionaler Unterstützung verschlechtert. Bei Personen mit hohem Vorwissen kann der gegenläufige Effekt beobachtet werden: je stärker Personen mit Vorwissen instruktional unterstützt werden, desto bessere Ergebnisse werden in der abhängigen Variable *Zuwachs Verständnis* erzielt.

Die unzureichende Wirksamkeit der instruktionalen Hilfestellungen geht in beiden Studien mit einer erhöhten kognitiven Belastung konform. Sowohl in der Studie 2 als auch in der Studie 3 gaben Personen mit geringem Vorwissen in den Simulationsgruppen an, sich durch zusätzliche instruktionale Hilfestellungen stärker kognitiv belastet gefühlt zu haben. Ferner fühlten sich Personen mit geringem Vorwissen stets stärker kognitiv belastet als Personen mit Vorwissen. Aufgrund dieser Ergebnisse in den Studien 2 und 3 müssen die Hypothese 6a und die Hypothese 6b für komplexe biologischen Lerngegenstände verworfen werden.

Eine mögliche Erklärung der schlechten Lernwirksamkeit zusätzlicher instruktionaler Unterstützungen für Personen mit geringem Vorwissen ergibt sich unter Berücksichtigung der kognitiven Belastung aus der „Cognitive Load Theory“ (Chandler & Sweller, 1991; Sweller et al., 1998). Die Theorie unterscheidet verschiedene Arten der kognitiven Belastung. Eine äußere, den Lernprozess im schlechtesten Fall behindernde kognitive Belastung (*extraneous cognitive load*) wird durch die Art und Weise der Gestaltung des Lernmaterials bewirkt und kann damit durch umsichtige Konstruktion von Lernmaterial kontrolliert werden (Sweller et al., 1998; Moreno & Mayer, 2000, 2002).

Als intrinsische kognitive Belastung (*intrinsic cognitive load*) einer Information wird dagegen diejenige bezeichnet, die vom Lerninhalt selbst ausgeht und damit durch die Gestaltung des Lernmaterials nicht zu beeinflussen ist. Hierbei ist entscheidend, wie viele Einzelelemente des Lerngegenstandes gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten und verarbeitet werden müssen, um die Zusammenhänge zu verstehen. Daher ist die intrinsische kognitive Belastung eines Lerninhalts umso größer, je stärker seine einzelnen Elemente durch Wechselwirkungen und Kausalbeziehungen miteinander verknüpft sind. Eine zu exzessive Belastung des Arbeitsgedächtnis wird dabei durch Schemakonstruktion umgangen. Unter einem Schema versteht man eine Zusammenfassung und Organisation von einzelnen Elementen eines Sachverhalts, das im Langzeitgedächtnis gespeichert wird. Schemata abstrahieren Wissen mit dem Ergebnis, dass eine Vielzahl von Informationen, die durch die Sinneskanäle beim Lernen aufgenommen werden, bereits nicht weiter beachtet werden müssen. Da das Schema eines Sachverhalts als ein einzelnes Element bei Abruf ins Arbeitsgedächtnis behandelt wird, resultiert aus der Schemakonstruktion eine enorme Entlastung desselben (vgl. VI 5.3).

Entsprechend sollte die Art und Weise der Materialgestaltung zur Erhöhung einer kognitiven Belastung beitragen, die die Aufmerksamkeit der Lernenden auf kognitive Prozesse richtet, die eine Schemakonstruktion bzw. das Verständnis eines Sachverhalts ermöglichen. Im Falle der Erhöhung einer für den Lernprozess relevanten kognitiven Belastung, die durch das Lernmaterial bewirkt wird, spricht man von *germane cognitive load*.

Lerninhalte wie die Atmungskette an der inneren Mitochondrienmembran und die Primärreaktionen an der Thylakoidmembran sind dadurch gekennzeichnet, dass hochkomplexe Strukturen im Hinblick auf ihrer Funktion miteinander wechselwirken. Darüber hinaus existieren in Bezug auf die zahlreiche Querbezüge zu physikalischen und chemischen Konzepten. Die Lerninhalte der Studien 2 und 3 zeichnen sich damit nach der „Cognitive Load Theory“ durch eine hohe intrinsische kognitive Belastung aus.

Verständnis findet erst dann statt, wenn die Elemente des Lernmaterials mit vielen Wechselwirkungen und Zusammenhängen zwischen seinen Elementen gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten und prozessiert werden können (Marcus et al., 1996; Sweller et al., 1998). Wie eben erläutert, wird dieses Problem gewöhnlich durch Schemakonstruktion und ihren Abruf aus dem Langzeitgedächtnis umgangen. Aufgrund des geringen Vorwissens standen den Versuchspersonen die relevanten Schemata z. B. einer inneren Mitochondrienmembran bzw. einer Thylakoidmembran nicht zur Verfügung, so dass diese zunächst im Rahmen der Lernsituation konstruiert werden mussten (Pollock et al., 2002). Dies erklärt den vorwiegenden Erwerb von Faktenwissen beim Arbeiten mit den Lernprogrammen.

Dass die zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen beim Arbeiten mit den Simulationen zu einer Erhöhung der kognitiven Belastung führten, steht im Widerspruch zu einer Untersuchung von Leutner (1993), bei dem sich zusätzliche Unterstützungen in Form von Basisinformationen als senkend für die kognitive Belastung und damit als hilfreich für den Wissenserwerb erwiesen hatten. Die Ergebnisse der vorliegenden Studien weisen allerdings eher darauf hin, dass zusätzliche instruktionale Unterstützung zu einer kognitiven Überlastung im Sinne von *extraneous cognitive load* führen und sich damit negativ auf Schemakonstruktion und den Erwerb von Verständnis auswirken. Die Ergebnisse der Studie 3 deuten an, dass die hier verwendeten Instruktionen erst für Personen mit höherem themenspezifischem Vorwissen im Sinne von *germane cognitive load* wirken und damit den Wissenserwerb beim Arbeiten mit Simulationen wirksam unterstützen können.

Als weitere mögliche Erklärung für die insgesamt schlechte Wirksamkeit der Instruktionen im Hinblick auf die Senkung der kognitiven Belastung und die Erhöhung des Verständnisses käme die Redundanz dieser zusätzlichen Informationen in Betracht. Sind bildliche Darstellungen wie Grafiken und Animationen selbsterklärend, so sind zusätzliche Erklärungstexte redundant (Chandler & Sweller, 1991; Mayer et al., 1996). Auch konnten Sweller und

Kollegen bei physischer Aktivität am Computer die Redundanz einer zusätzlichen Bedienungsanleitung zum Computerprogramm nachweisen (Cerpa, Chandler & Sweller, 1996; Chandler & Sweller, 1996; Sweller & Chandler, 1994). Möglicherweise haben auch in diesen Studien die einleitenden Erläuterungen und Animationen in den interaktiven Simulationen ausgereicht, um den Erwerb von Schemata anzubahnen, so dass die zusätzliche Belastung des Arbeitsgedächtnisses mit den redundanten Informationen der instruktionalen Unterstützungen schlechtesten Fall zu einer kognitiven Überlastung geführt hat.

3 AUSBLICK

In den hier vorgestellten Studien wurde die Wirksamkeit von Animation und Simulation auf das Verständnis komplexer stoffwechselphysiologischer Prozesse an biologischen Membranen untersucht. Dabei war beabsichtigt, Wissen über die biologischen Membranen und ihre Funktionen kumulativ zu vermitteln, während die Komplexität der Unterrichtsinhalte von Untersuchung zu Untersuchung anstieg.

Unabhängig vom Lerngegenstand und seiner Vermittlung durch die verschiedenen computergestützten Lernumgebungen ist in dieser Arbeit immer wieder deutlich geworden, dass ein tieferes Verständnis der komplexen biologischen Vorgänge nicht ohne das entsprechende Vorwissen zu erwirken ist. In diesen Untersuchungen konnten damit die lernförderlichen Effekte, die gemeinhin animierten Darstellungen und interaktiven Lernumgebungen zugeschrieben werden, nicht bestätigt werden. Insbesondere war es nicht möglich, eine kompensatorische Wirkung einer bestimmten computergestützten Lernumgebung im Hinblick auf die Vorwissensdefizite nachzuweisen. Des Weiteren ist mehrfach deutlich geworden, dass die kognitive Belastung, die aus der unangemessenen Gestaltung von instruktionalen Hilfestellungen resultierte, eine negative Auswirkung auf die Lernleistung hat. Davon sind besonders Personen mit geringem Vorwissen betroffen, die per se über keine Schemata bezüglich des Lerngegenstandes verfügen.

Insgesamt bleibt damit die Frage dieser Studien unbeantwortet, unter welchen Voraussetzungen und mit welchem besonderem instruktionalen Design Animation und Simulation positiv auf den Verständniserwerb beim Erlernen komplexer biologischer Prozesse einwirken können. In einer nachfolgenden Studie sollte die breitere Streuung des Vorwissens gewährleistet sein. Vermutlicherweise lassen sich auf dieser Basis Treatmenteffekte für die unterschiedlichen Stadien des Vorwissens nachweisen.

Für den Einsatz von computergestützten Lernumgebungen in der Schule sollte in künftigen Studien eine Antwort auf die Frage gefunden werden, wie instruktionale Hilfestellungen in komplexen Lernumgebungen wie Simulationen gestaltet sein müssen, so dass sie bei Personen mit geringem Vorwissen eine Reduzierung der kognitiven Belastung durch Schemakonstruktion und den nachfolgenden Erwerb von Verständnis ermöglichen. Gerade für das Unterrichtsgeschehen wären Lernumgebungen von Interesse, die an den speziellen Bedarf der Unterrichtssituation angepasst werden können. Solche intelligenten tutoriellen Systeme sollten dann entsprechend des Vorwissensstandes der Person, die das Lernprogramm bearbeitet, eine adäquate instruktionale Unterstützung anbieten. Auf diese Weise würden sich die Lernumgebungen sowohl zur Einführung in einen Lerninhalt als auch zur Wiederholung oder zur weiterführenden Vertiefung eignen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden ausschließlich kognitive Faktoren berücksichtigt, die den Lernerfolg beeinflussen könnten. Ungeklärt bleibt daher, welchen Einfluss motivationale Aspekte beim Lernen mit dem Computer haben. Bei weiteren Auswertungen im Rahmen dieses Projekts sollen daher die Lernwirksamkeit von Simulationen unter Berücksichtigung des themenspezifischen und medialen Interesses analysiert werden. Auffällig war bei einer ersten Sondierung der Daten, dass der Anteil an Personen mit starker kognitiver Belastung und schlechter Motivation bei den Simulationen mit Instruktionen besonders hoch ist. Des Weiteren deutete sich hier bereits an, dass motivierte Personen bei gleicher oder sogar stärkerer kognitiver Belastung besser lernen als nicht motivierte Probanden. Einer positiven Motivation könnte beim Lernen mit Simulationen ein gewisser kompensatorischer Effekt zugeschrieben werden. Die genauen Wechselwirkungen zwischen Vorwissen, kognitiver Belastung und motivationalen Effekten beim Lernen mit Simulationen werden dann in weiteren Studien zu klären sein.

IX ANHANG

1 LITERATUR

- Asymetrix-Learning-Systems. (1999). Tool Book II Instructor 7. USA: Asymetrix Learning Systems, Inc.
- Baumert, J., & Bos, W. (1998). *TIMMS/III: Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich* (2., überarb. Auflage ed.). Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.-J., & Weiß, M. (Hrsg.). (2001). *PISA 2000: Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich*. Opladen: Leske und Budrich.
- Bortz, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bortz, J., & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler* (2 ed.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Cerpa, N., Chandler, P., & Sweller, J. (1996). Some conditions under which integrated computer-based training software can facilitate learning. *Journal of Educational Computing Research*, 15(4), 345-367.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293-332.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1996). Cognitive load while learning to use a computer program. *Applied Cognitive Psychology*, 10(2), 151-170.
- Clark, J. M., & Paivio, A. (1991). Dual coding theory and education. *Educational Psychology Review*, 3(3), 149-210.
- Davier, M. v. (2001). WINMIRA 2001. Kiel.
- de Jong, T., & Njoo, M. (1992). Learning and instruction with computer simulations: Learning processes involved. In E. De Corte & M. C. Linn & H. Mandl & L. Verschaffel (Eds.), *Computer-Based Learning Environments and Problem Solving* (pp. 411-427). Berlin: Springer.
- de Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179-201.
- Ernst Klett Verlag. (1999). Mediothek Biologie 1 "Zelluläre Phänomene". Stuttgart, Düsseldorf, Leipzig: Ernst Klett Verlag.
- Euler, D. (1994). (Multi)mediales Lernen: Theoretische Fundierungen und Forschungsstand. *Unterrichtswissenschaft*, 22(4), 291-311.
- Fischer, P. M., & Mandl, H. (1990). Introduction: Toward a psychophysics of hypermedia. In D. H. Jonassen & H. Mandl (Eds.), *Designing Hypermedia for Learning*. Heidelberg: Springer.
- Gage, N., L., & Berliner, D., C. (1977). *Pädagogische Psychologie, Lehrerhandbuch. Erziehungswissenschaftliche Grundlagen für die Unterrichtspraxis. Educational psychology, Teacher manual. Scientific foundations of teaching practice*.

- Haack, J. (1995). Interaktivität als Kennzeichen von Multimedia und Hypermedia. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia* (pp. 151-166). Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Hasebrook, J. P. (1995a). Lernen mit Multimedia. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 9(2), 95-103.
- Hasebrook, J. P. (1995b). *Multimedia-Psychologie: Eine neue Perspektive menschlicher Kommunikation*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Kintsch, W. (1986). Learning from text. *Cognition and Instruction*, 3(2), 87-108.
- Lee, S. S., & Lee, Y. H. (1991). Effects of learner-control versus program-control strategies on computer-aided learning of chemistry problems: For acquisition or review? *Journal of Educational Psychology*, 83(4), 491-498.
- Leutner, D. (1993). Guided discovery learning with computer based simulation games: Effects of adaptive and non adaptive instructional support. *Learning and Instruction*, 3(2), 113-132.
- Lewalter, D. (1997). *Lernen mit Bildern und Animationen: Studie zum Einfluss von Lernermerkmalen auf die Effektivität von Illustrationen*. Münster: Waxmann.
- Macromedia. (2000). Macromedia Director 8 Shockwave Studio (Version 8.0). San Francisco, USA: Macromedia, Inc.
- Marcus, N., Cooper, M., & Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, 88(1), 49-63.
- Mayer, R. E. (1984). Aids to text comprehension. *Educational Psychologist*, 19(1), 30-42.
- Mayer, R. E. (1997). Multimedia learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist*, 32(1), 1-19.
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E., & Anderson, R. B. (1991). Animations need narrations: An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83(4), 484-490.
- Mayer, R. E., & Anderson, R. B. (1992). The instructive animation: Helping students build connections between words and pictures in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), 444-452.
- Mayer, R. E., Bove, W., Bryman, A., Mars, R., & Tapangco, L. (1996). When less is more: Meaningful learning from visual and verbal summaries of science textbook lessons. *Journal of Educational Psychology*, 88(1), 64-73.
- Mayer, R. E., & Gallini, J. K. (1990). When is an illustration worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 82(4), 715-726.
- Mayer, R. E., & Sims, V. K. (1994). For whom is a picture worth 1000 words: Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 86(3), 389-401.
- Mayer, R. E., Steinhoff, K., Bower, G., & Mars, R. (1995). A generative theory of textbook design: Using annotated illustrations to foster meaningful learning of science text. *Educational Technology Research and Development*, 43, 31-44.
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning: the role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology*, 91, 358-368.
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2000). A coherence effect in multimedia learning: The case for minimizing irrelevant sounds in the design of multimedia instructional messages. *Journal of Educational Psychology*, 92(1), 117-125.

- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2002). Verbal redundancy in multimedia learning: When reading helps listening. *Journal of Educational Psychology*, 94(1), 156-163.
- Mousavi, S. Y., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology*, 87(2), 319-334.
- Paivio, A. (1978). A dual coding approach to perception and cognition. In H. L. Pick & E. Saltzman (Eds.), *Modes of percieving and processing information* (pp. 39-52). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual-coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Paivio, A., & Harshman, R. A. (1983). Factor-analysis of a questionnaire on imagery and verbal habits and skills. *Canadian Journal of Psychology-Revue Canadienne De Psychologie*, 37(4), 461-483.
- Park, O. C., & Hopkins, R. (1992). Instructional conditions for using dynamic visual displays: A review. *Instructional Science*, 21(6), 427-449.
- Peeck, J. (1993). Increasing picture effects in learning from illustrated text. *Learning and Instruction*, 3(3), 227-238.
- Peeck, J. (1994). Enhancing graphic effects in instructional texts: Influencing learning activities. In W. Schnotz & R. W. Kulhavy (Eds.), *Comprehension of Graphics* (pp. 291-301). Amsterdam: North-Holland/Elsevier Science Publishers.
- Plass, J. L., Chun, D. M., Mayer, R. E., & Leutner, D. (1998). Supporting visual and verbal learning preferences in a second-language multimedia learning environment. *Journal of Educational Psychology*, 90(1), 25-36.
- Pollock, E., Chandler, P., & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, 12, 61-86.
- Prechtel, H., & Nerdel, C. (2002). Aufgaben beim computergestützten Lernen - dargestellt an einer Simulation zu den Primärreaktionen der Fotosynthese. *Praxis der Naturwissenschaften - Biologie in der Schule*, 8(51), 25-31.
- Rieber, L. P. (1990). Using computer animated graphics with science instruction with children. *Journal of Educational Psychology*, 82(1), 135-140.
- Rieber, L. P., & Kini, A. S. (1991). Theoretical foundations of instructional applications of computer-generated animated visuals. *Journal of Computer Based Instruction*, 18(3), 83-88.
- Rost, J. (1996). *Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion*. Bern: Huber.
- Rost, J. (1999). Test- und Fragebogenanalyse. In B. Strauß & H. Haag & M. Kolb (Hrsg.), *Datenanalyse in der Sportwissenschaft*. Schorndorf: Hofmann.
- Salomon, G. (1974). Internalization of filmic schematic operations in interaction with learners' aptitudes. *Journal of Educational Psychology*.
- Salomon, G. (1979). *Interaction of Media, Cognition, and Learning: An Exploration of how Symbolic Forms Cultivate Mental Skills and Affect Knowledge Acquisition*. San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Schnotz, W. (1993). Some remarks on the commentary: On the relation of dual coding and mental models in graphics comprehension. *Learning and Instruction*, 3(3), 247-249.
- Schnotz, W., Bockheler, J., & Grzondziel, H. (1999). Individual and co-operative learning with interactive animated pictures. *European Journal of Psychology of Education*, 14(2), 245-265.

- Schnotz, W., Boeckheler, J., Grzondziel, H., Gaertner, I., & Waechter, M. (1998). Individuelles und kooperatives Lernen mit interaktiven animierten Bildern. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 12(2/3), 135-145.
- Schnotz, W., Zink, T., & Pfeiffer, M. (1996). Visualisierungen im Lehr-Lern-Prozess. *Zeitschrift für Pädagogik*, 42(2), 193-213.
- SPSS. (2001). SPSS 10.0.7 für Windows. Chicago, Illinois: SPSS, Inc.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185-233.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251-296.
- Urhahne, D. (2002). *Motivation und Verstehen* (Vol. 32). Münster: Waxmann.
- Weidenmann, B. (1989). When good pictures fail: An information processing approach to the effect of illustrations. In H. Mandl & J. R. Levin (Eds.), *Knowledge Acquisition from Text and Pictures* (pp. 157-170). Amsterdam: North-Holland.
- Wittrock, M. C. (1974). Learning as a generative process. *Educational Psychologist*, 11(2), 87-95.
- Wittrock, M. C. (1989). Generative processes of comprehension. *Educational Psychologist*, 24(4), 345-376.

2 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle IV-1: Prinzipielle Varianten der Lernumgebungen in den hypothesenprüfenden Studien 2 (Atmungskette) und 3 (Fotosynthese).....	27
Tabelle IV-2: Übersicht über die gemessenen Konstrukte in den Vortests der Studien 1-3 ..	29
Tabelle IV-3: Übersicht über die gemessene Konstrukte in den Nachtests der Studien 1-3..	31
Tabelle IV-4: Übersicht über die Besetzung der Experimentalgruppen in den Studien; Angaben in Versuchspersonen, die bei der Auswertung des Vor- und Nachtests berücksichtigt werden konnten.....	35
Tabelle IV-5: Schema der Datenerhebung in den Studien 1-3.....	36
Tabelle IV-6: Berechnung der abhängigen Untersuchungsvariablen.....	39
Tabelle IV-7: Klassifikation des Korrelationskoeffizienten r	41
Tabelle IV-8: Auswertungsschema zur Überprüfung der Forschungshypothesen auf der Basis inferenzstatistischer Methoden.....	42
Tabelle IV-9: Beispiel für eine Kreuztabelle, die die Wanderungsbewegungen zwischen den Klassen dokumentiert.....	50
Tabelle IV-10: Kategorien des Lernerfolgs für die latente Klassenanalyse.....	53
Tabelle V-1: Rotierte Komponentenmatrix der Items zu verbalen und visuellen Gewohnheiten und Fähigkeiten.....	63
Tabelle V-2: Deskriptive Statistiken für die Skalen des Vortests in Studie 1.....	64
Tabelle V-3: Rotierte Komponentenmatrix der Items zu den Skalen <i>Kognitive Belastung</i> , <i>Interesse</i> und <i>Aufmerksamkeit</i>	65
Tabelle V-4: Deskriptive Statistiken für die Skalen des Nachtests in Studie 1.....	67
Tabelle V-5: Häufigkeiten der erzielten Punktesummen differenziert nach Faktenwissen und Verständnis.....	69
Tabelle V-6: Zuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis.....	71
Tabelle V-7: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte.....	73
Tabelle V-8: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs.....	74
Tabelle V-9: Bivariate Korrelationen nach Pearson zwischen dem Faktenwissen im Vortest und den Verständnisleistungen in Vor- und Nachtest zum Thema „Transportprozesse an Biomembranen“.....	76
Tabelle V-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“.....	77
Tabelle V-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“.....	77
Tabelle V-12: Unterschied in der Verständnisleistung der beiden Vorwissensgruppen.....	78
Tabelle V-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“.....	78
Tabelle V-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“.....	78
Tabelle V-15: Unterschiede in den Leistungen bzgl. <i>Lernzuwachs gesamt</i> , Faktenwissen und Verständnis für die Gruppen „Verbalisierer“ und „Visualisierer“.....	80

Tabelle V-16: Unterschied in der kognitiven Belastung bei unterschiedlich großem Vorwissen.....	80
Tabelle V-17: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der kognitiven Belastung und den drei Maßen des Lernerfolgs	81
Tabelle VI-1: Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen in Studie 2 (Atmungskette).....	104
Tabelle VI-2: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Vortests in Studie 2	105
Tabelle VI-3: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Nachtests in Studie 2	106
Tabelle VI-4: Häufigkeiten der erzielten Summenscores differenziert nach Faktenwissen und Verständnis	108
Tabelle VI-5: Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis	110
Tabelle VI-6: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte	111
Tabelle VI-7: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs.	112
Tabelle VI-8: Unterschiede in den Leistungen bzgl. <i>Lernzuwachs gesamt</i> , <i>Zuwachs Faktenwissen</i> und <i>Zuwachs Verständnis</i> für die Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“	114
Tabelle VI-9: Bivariate Korrelationen zwischen dem Faktenwissen zum Thema die Atmungskette im Vortest und den Verständnisleistungen von Vor- und Nachtest sowie dem Zuwachs in dieser Kategorie.....	115
Tabelle VI-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“	116
Tabelle VI-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“	116
Tabelle VI-12: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i> in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Standbild, Animation) und Vorwissen (gering, hoch)	117
Tabelle VI-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“	118
Tabelle VI-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“	118
Tabelle VI-15: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Lernzuwachs gesamt</i>	119
Tabelle VI-16: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für den <i>Zuwachs Faktenwissen</i>	120
Tabelle VI-17: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Zuwachs Verständnis</i>	120
Tabelle VI-18: Zuwächse in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppe „Animation“ und die zusammengefasste Gruppe „beide Simulationen“	121
Tabelle VI-19: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“	122
Tabelle VI-20: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“	123

Tabelle VI-21: Gruppenvergleich der Mittelwerte in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“	124
Tabelle VI-22: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i> in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1, Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2) und Vorwissen (gering, hoch).....	125
Tabelle VI-23: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für <i>kognitive Belastung</i> als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung, Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Hilfestellung) und Vorwissen (gering, hoch)	126
Tabelle VI-24: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der <i>kognitiven Belastung</i> und den drei Maßen des Lernerfolgs	127
Tabelle VI-25: Geltung ausgewählter probabilistischer Testmodelle	130
Tabelle VI-26: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten [Standardabweichung] für die drei latenten Klassen des Modells	131
Tabelle VI-27: Kreuztabellierung des Klassenwechsels nach gemeinsamer Modellierung von Vor- und Nachtest.	135
Tabelle VI-28: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die beiden Gruppen von Stagnierenden	136
Tabelle VI-29: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die beiden Gruppen von Stagnierenden	136
Tabelle VI-30: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von Lernern	138
Tabelle VI-31: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von Lernern	139
Tabelle VI-32: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der den beiden Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs.	140
Tabelle VI-33: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs	141
Tabelle VI-34: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und der Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs. IH: Abkürzung für „instruktionale Hilfestellungen“	142
Tabelle VI-35: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Studie 2 in tabellarischer Übersicht	143
Tabelle VII-1: Stichprobe und Besetzung der Experimentalgruppen in Studie 3 (Fotosynthese).....	178
Tabelle VII-2: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Vortests in Studie 3	179
Tabelle VII-3: Deskriptive Statistiken und Reliabilitäten für die Skalen des Nachtests in Studie 3	180
Tabelle VII-4: Häufigkeiten der erzielten Summenscores differenziert nach Faktenwissen und Verständnis	182

Tabelle VII-5: Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis	184
Tabelle VII-6: Deskriptive Statistiken für die Summenscores von Vor- und Nachtest sowie für ihre Differenzwerte	185
Tabelle VII-7: Korrelationen nach Pearson zwischen Vor- und Nachtest in den drei Kategorien des Lernerfolgs.	186
Tabelle VII-8: Leistungsunterschiede bzgl. <i>Lernzuwachs gesamt</i> , <i>Zuwachs Faktenwissen</i> und <i>Zuwachs Verständnis</i> für die Experimentalgruppen Standbild und Animation.....	188
Tabelle VII-9: Bivariate Korrelationen zwischen dem Faktenwissen im Vortest und den Verständnisleistungen von Vor- bzw. Nachtest zum Thema „ Primärreaktionen der Fotosynthese“	189
Tabelle VII-10: Deskriptive Statistik für die Gruppe „geringes Vorwissen“	190
Tabelle VII-11: Deskriptive Statistik für die Gruppe „hohes Vorwissen“	190
Tabelle VII-12: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i> in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Standbild, Animation) und Vorwissen (gering, hoch)	191
Tabelle VII-13: Deskriptive Statistik für den Cluster „Verbalisierer“	192
Tabelle VII-14: Deskriptive Statistik für den Cluster „Visualisierer“	192
Tabelle VII-15: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Lernzuwachs gesamt</i>	194
Tabelle VII-16: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für den <i>Zuwachs Faktenwissen</i>	194
Tabelle VII-17: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Zuwachs Verständnis</i>	195
Tabelle VII-18: Zuwächse in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppe „Animation“ und die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“	196
Tabelle VII-19: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichungen der drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation 1“. ..	197
Tabelle VII-20: Gruppenvergleich der Mittelwerte in den drei abhängigen Variablen für die Experimentalgruppen Simulation 1 und die Simulationen 2 und 3 (zusammengefasste Gruppe).....	198
Tabelle VII-21: Stichprobe, Mittelwerte und Standardabweichung für den Vergleich der Experimentalgruppen Simulation 1 und Simulation 3.	199
Tabelle VII-22: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i> in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation 1, Simulation (2+3)) und Vorwissen (gering, hoch)	201
Tabelle VII-23: Stichprobengrößen, Mittelwerte und Standardabweichung für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i> in der 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (dreifach gestuft; Simulation 1, 2 und 3) und Vorwissen (gering, hoch).....	202
Tabelle VII-24: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für kognitive Belastung als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung, Simulationen mit zusätzlicher instruktionaler Hilfestellung) und Vorwissen (gering, hoch)	203
Tabelle VII-25: Stichproben, Mittelwerte und Standardabweichung für kognitive Belastung als abhängige Variable in einer 2x2-Anova mit den Faktoren Experimentalgruppe (Simulation 1, 2 und 3) und Vorwissen (gering, hoch)	204

Tabelle VII-26: Pearsons Korrelationskoeffizienten für die Korrelationen zwischen der Kognitiven Belastung und den drei Maßen des Lernerfolgs	205
Tabelle VII-27: Geltung ausgewählter probabilistischer Testmodelle	207
Tabelle VII-28: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten [Standardabweichung] für die drei latenten Klassen des Modells	209
Tabelle VII-29: Kreuztabellierung des Klassenwechsels nach gemeinsamer Modellierung von Vor- und Nachtest.	211
Tabelle VII-30: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von „Stagnierenden“	212
Tabelle VII-31: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von „Stagnierenden“	212
Tabelle VII-32: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die beiden Gruppen von „Verlernern“	213
Tabelle VII-33: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die beiden Gruppen von „Verlernern“	213
Tabelle VII-34: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der den beiden Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs und unter Berücksichtigung des Vorwissens.	217
Tabelle VII-35: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs	217
Tabelle VII-36: Vergleich der relativen Personenhäufigkeiten der Experimentalgruppe „Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung“ (Simulation 1) und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen mit zusätzlicher instruktionalen Hilfestellung“ (Simulation 2 + Simulation 3) in den verschiedenen Kategorien des Lernerfolgs.....	218
Tabelle VII-37: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Studie 3 in tabellarischer Übersicht	219
Tabelle VIII-1: Zusammenfassende und vergleichende Darstellung der Untersuchungsergebnisse aus Studie 2 (Atmungskette) und Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese)	235
Tabelle IX-1: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung	292
Tabelle IX-2: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung	292
Tabelle IX-3: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen	293
Tabelle IX-4: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen	293
Tabelle IX-5: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Standbild“	294
Tabelle IX-6: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Animation“	294
Tabelle IX-7: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“	295
Tabelle IX-8: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung1“	295
Tabelle IX-9: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“	296

Tabelle IX-10: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung	296
Tabelle IX-11: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung	297
Tabelle IX-12: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen. Angegeben sind die Personenhäufigkeiten.....	297
Tabelle IX-13: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen	298
Tabelle IX-14: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Standbild“	298
Tabelle IX-15: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Animation“	299
Tabelle IX-16: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“	299
Tabelle IX-17: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen mit Instruktionen“	300
Tabelle IX-18: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung“	300
Tabelle IX-19: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung1“	301
Tabelle IX-20: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“	301
Tabelle IX-21: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von „Lernern“	302
Tabelle IX-22: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von „Lernern“	302

3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung II-1: Schematisches Modell zu Mayers <i>Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens</i> (verändert nach Mayer, 2001).....	8
Abbildung V-1: Modell einer Biomembran mit exemplarischen Membranproteinen.....	56
Abbildung V-2: Verschiedene Transportarten	59
Abbildung V-3: Einleitende Textseite	61
Abbildung V-4: Stehendes Bild zu den aktiven Transportprozessen	61
Abbildung V-5: Erläuterungstext zum stehenden Bild	61
Abbildung V-6: Lernkontrollfrage zum aktiven Transport	61
Abbildung V-7: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Faktenwissenitems in Vor- und Nachtest	70
Abbildung V-8: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Verständnisitems in Vor- und Nachtest	70
Abbildung V-9: Häufigkeiten der Zuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in Faktenwissen und Verständnis.....	72
Abbildung V-10: Mittelwerte für Vor- und Nachtest sowie den Zuwachs in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis.....	73
Abbildung V-11: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“ in der Studie 1	79
Abbildung VI-1: Text-Bild-Kombinationen des vierten Abschnitts in der Standbildversion zur Atmungskette.	96
Abbildung VI-2: Startscreen der Simulation mit Darstellung der inneren Mitochondrienmembran	99
Abbildung VI-3: Erläuterung zum Feld 1 auf dem Startscreen	100
Abbildung VI-4: Erläuterung zum Feld 2 auf dem Startscreen	100
Abbildung VI-5: Erläuterung zum Feld 3 (Steuerfeld) auf dem Startscreen	100
Abbildung VI-6: Erste Aufgabenstellung in der Simulation zur Atmungskette	101
Abbildung VI-7: Erste Auswahlseite der Simulation	101
Abbildung VI-8: Beispiel für eine zweite Auswahlseite der Simulation	102
Abbildung VI-9: Auswahloptionen nach Ablauf der Darstellung an der inneren Mitochondrienmembran für die ausgewählte Substanz 2	102
Abbildung VI-10: Antwortseite zur Aufgabe 1	103
Abbildung VI-11: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Faktenwissenitems in Vor- und Nachtest	109
Abbildung VI-12: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Verständnisitems in Vor- und Nachtest	109
Abbildung VI-13: Häufigkeiten der errechneten Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest (Zuwachs) für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis.....	110

Abbildung VI-14: Mittelwerte für den Vor- und Nachtest sowie ihre Differenz (Zuwachs) in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis	111
Abbildung VI-15: Mittelwertvergleich der Experimentalgruppen „Standbild“ und „Animation“ für die drei abhängigen Variablen	114
Abbildung VI-16: Gruppenvergleich des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	117
Abbildung VI-17: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“. Auf der Abszisse sind die Mittelwerte der verbalen Lernpräferenz, auf der Ordinate diejenigen für die visuelle Lernpräferenz aufgetragen.	118
Abbildung VI-18: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Lernzuwachs gesamt</i>	119
Abbildung VI-19: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Zuwachs Faktenwissen</i>	120
Abbildung VI-20: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	120
Abbildung VI-21: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ für die drei abhängigen Variablen <i>Lernzuwachs gesamt, Zuwachs Faktenwissen und Zuwachs Verständnis</i>	121
Abbildung VI-22: Mittelwertvergleiche der Experimentalgruppen „Animation“, „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ für die drei abhängigen Variablen	123
Abbildung VI-23: Mittelwerte der Experimentalgruppen „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“ und „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 2“ für die drei abhängigen Variablen	124
Abbildung VI-24: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	125
Abbildung VI-25: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Kognitive Belastung</i>	126
Abbildung VI-26: Itemprofile der drei latenten Klassen des klassifizierenden Testmodells für den gemeinsamen Datensatz bestehend aus Vor- und Nachtest.....	132
Abbildung VI-27: schematische Übersicht Lernerfolg unter Berücksichtigung des Vorwissens	139
Abbildung VII-1: Einleitender Text.....	169
Abbildung VII-2: Bildung eines zweiten Reduktionsäquivalents; stehendes Bild mit Bewegungsindikatoren.....	169
Abbildung VII-3: Erläuterungstext zur obigen Abbildung, der über den ?-Button abgerufen werden kann.....	169
Abbildung VII-4: Einleitender Text.....	170
Abbildung VII-5: 1. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents.....	170
Abbildung VII-6: 2. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents.....	170
Abbildung VII-7: 3. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents.....	170
Abbildung VII-8: 4. Screenshot aus der animierten Sequenz zur Bildung des zweiten Reduktionsäquivalents.....	170

Abbildung VII-9: Erläuterungstext zur Animation.....	170
Abbildung VII-10: Auswahlseite zur Simulation „Primärreaktionen der Fotosynthese“	171
Abbildung VII-11: Animation zum Parameter „Licht“ in der Rubrik „Info“	172
Abbildung VII-12: Erläuterungstext zur obigen Animation, der über den ?-Button abrufbar ist.	172
Abbildung VII-13: Animierte Darstellung zur Parameterkombination „Licht“, „Wasser“, „NADP ⁺ “ und „ADP“	172
Abbildung VII-14: Aufgabe 1 „Elektronentransport“ zur Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“	173
Abbildung VII-15: Antwortseite zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“	173
Abbildung VII-16: Feedback zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ bei richtiger Antwort	173
Abbildung VII-17: Beispiel für eine weiterführende Lernkontrollfrage zur Aufgabe 1 „Elektronentransport“ in der Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“	174
Abbildung VII-18: Infoseite der „Simulation mit instruktionalen Hilfestellungen 1“	175
Abbildung VII-19: Erste Aufgabe „Elektronentransport“ zur Bearbeitung der Simulation	175
Abbildung VII-20: Antwortseite zur Aufgabe „Elektronentransport“	175
Abbildung VII-21: Weiterführende Lernkontrollfrage zur Aufgabe „Elektronentransport“	175
Abbildung VII-22: Anleitung zur Bearbeitung der Simulation	176
Abbildung VII-23: Auswahlseite zur Simulation „Die Primärreaktionen der Fotosynthese“ ..	176
Abbildung VII-24: Erster Teil der Checkliste zur Simulation „Die Primärreaktionen“	177
Abbildung VII-25: Zweiter Teil der Checkliste zur Simulation „Die Primärreaktionen“	177
Abbildung VII-26: Erläuterungstext zur animierten Darstellung bei Auswahl der Parameterkombination „Licht“, „Wasser“, „NADP ⁺ “ und „ADP“	177
Abbildung VII-27: Hilfe zu einer falsch beantworteten Aufgabe	177
Abbildung VII-28: Unterstützung zu einer Lernkontrollfrage.....	178
Abbildung VII-29: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Faktenwissenitems in Vor- und Nachtest	183
Abbildung VII-30: Häufigkeiten der erzielten Summenscores für die Verständnisitems in Vor- und Nachtest	183
Abbildung VII-31: Häufigkeiten der errechneten Differenzen (Zuwächse) aus Nachtest und Vortest für die Kategorien Faktenwissen und Verständnis	184
Abbildung VII-32: Mittelwerte für den Vor- und Nachtest sowie ihre Differenz in den drei Kategorien Gesamt, Faktenwissen und Verständnis	185
Abbildung VII-33: Mittelwerte der Experimentalgruppen Standbild und Animation für die drei abhängigen Variablen	188
Abbildung VII-34: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	191
Abbildung VII-35: Streudiagramm für die beiden Cluster „Verbalisierer“ und „Visualisierer“.	193
Abbildung VII-36: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Lernzuwachs gesamt</i>	194

Abbildung VII-37: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Zuwachs Faktenwissen</i>	194
Abbildung VII-38: Gruppenvergleiche des Mittelwerts der abhängigen Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	195
Abbildung VII-39: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Animation“ und der zusammengefassten Gruppe „Simulationen“ für die drei abhängigen Variablen <i>Lernzuwachs gesamt, Zuwachs Faktenwissen</i> und <i>Zuwachs Verständnis</i>	196
Abbildung VII-40: Mittelwertvergleiche der Experimentalgruppen „Animation“ und „Simulation 1“ für die drei abhängigen Variablen	197
Abbildung VII-41: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Simulation 1“ (mit minimalen instruktionalen Hilfestellung) und zusammengefasste Gruppe „Simulation 2 + Simulation 3“ (Simulationen mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen) für die drei abhängigen Variablen	199
Abbildung VII-42: Mittelwerte der Experimentalgruppe „Simulation 1“ (mit minimaler instruktionaler Hilfestellungen) und „Simulation 3“ (mit zusätzlichen instruktionaler Hilfestellungen) für die drei abhängigen Variablen	200
Abbildung VII-43: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	201
Abbildung VII-44: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Zuwachs Verständnis</i>	202
Abbildung VII-45: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Kognitive Belastung</i>	203
Abbildung VII-46: Gruppenvergleiche des Mittelwerts für die abhängige Variable <i>Kognitive Belastung</i>	204
Abbildung VII-47: Itemprofile der drei latenten Klassen eines 3-Klassen-LCA-Modells für den gemeinsamen Datensatz bestehend aus Vor- und Nachtest	209
Abbildung VII-48: schematische Übersicht Lernerfolg unter Berücksichtigung des Vorwissens	215

4 SOFTWARE

4.1 Verzeichnis der Software und ihre technischen Details

Die Software kann als Demoversion auf Anfrage bei der Autorin bezogen werden.

Claudia Nerdel, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN),
Abt. Didaktik der Biologie, Olshausenstraße 62, 24098 Kiel, nerdel@ipn.uni-kiel.de

oder auch

http://www.ipn.uni-kiel.de/abt_bio/persons/nerdel/nerdel.htm

(Stand: Mai 2003)

4.1.1 Studie 1 (Biomembranen)

Lernsoftware zur Diffusion, Osmose und zum Transport über biologische Membranen. 38
Seiten.

Programmierung: Tim Höffler, Inka Lindner, Manfred Schenzer

Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtel, Manfred Schenzer

Grafiken: Ernst Klett Verlag, Mediothek 1 „Zelluläre Phänomene“

4.1.2 Studie 2 (Atmungskette)

Lernsoftware zur Atmungskette, Version 1: Standbildversion mit Text-Bild-Kombinationen.
162 Seiten.

Programmierung: Tim Höffler, Inka Lindner, Claudia Nerdel, Manfred Schenzer

Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtel, Manfred Schenzer

Grafiken: Claudia Nerdel

Lernsoftware zur Atmungskette, Version 2: Animationsversion mit Text-Animations-Kombinationen. 159 Seiten.

Programmierung: Tim Höffler, Inka Lindner, Claudia Nerdel, Manfred Schenzer
Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl, Manfred Schenzer
Grafiken: Claudia Nerdel
Hinweis Für die Bearbeitung des Programms ist die Installation einer Vollversion von Toolbook II Instruktor 7 oder höher erforderlich.

Lernsoftware zur Atmungskette, Version 3: Simulation. 196 Seiten.

Programmierung: Tim Höffler, Inka Lindner, Claudia Nerdel, Manfred Schenzer
Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl, Manfred Schenzer
Grafiken: Claudia Nerdel
Hinweis Für die Bearbeitung des Programms ist die Installation einer Vollversion von Toolbook II Instruktor 7 oder höher erforderlich.

4.1.3 Studie 3 (Fotosynthese)

Lernsoftware zu den Primärreaktionen der Fotosynthese, Version 1: Standbildversion mit Text-Bild-Kombinationen. 82 Seiten.

Programmierung: Tim Höffler, Boy Kramer, Inka Lindner, Claudia Nerdel
Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl
Grafiken: Claudia Nerdel

Lernsoftware zu den Primärreaktionen der Fotosynthese, Version 2: Animationsversion mit Text-Animation-Kombinationen. 83 Seiten mit Quicktime-Movies.

Programmierung: Tim Höffler, Boy Kramer, Inka Lindner, Claudia Nerdel
Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl
Grafiken: Claudia Nerdel

Lernsoftware zu den Primärreaktionen der Fotosynthese, Version 3: Simulation 1 mit minimalen instruktionalen Hilfestellungen. 67 Seiten mit Quicktime-Movies.

Programmierung: Tim Höffler, Boy Kramer, Inka Lindner, Claudia Nerdel

Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl

Grafiken: Claudia Nerdel

Lernsoftware zu den Primärreaktionen der Fotosynthese, Version 4: Simulation 2 mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen 1. 65 Seiten mit Quicktime-Movies.

Programmierung: Tim Höffler, Boy Kramer, Inka Lindner, Claudia Nerdel

Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl

Grafiken: Claudia Nerdel

Lernsoftware zu den Primärreaktionen der Fotosynthese, Version 5: Simulation 3 mit zusätzlichen instruktionalen Hilfestellungen 2. 90 Seiten mit Quicktime-Movies.

Programmierung: Tim Höffler, Boy Kramer, Inka Lindner, Claudia Nerdel

Autoren: Claudia Nerdel, Helmut Prechtl

Grafiken: Claudia Nerdel

4.2 Beispiele für Lehrtexte aus der Lernsoftware

4.2.1 Studie 2 (Atmungskette): Standbild und Animation

Einleitung

Die chemische Energie der Glucose steckt zu einem kleinen Teil in den ATP und GTP, die in den vorherigen Reaktionen entstanden sind. Der größte Anteil steckt jedoch in den produzierten $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 . In diesen beiden Molekülen stecken Wasserstoffatome, die mit dem eingeatmeten Sauerstoff reagieren. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff wird Knallgasreaktion genannt. Bei dieser Reaktion wird explosionsartig Energie frei. In der Zelle wird die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff "gezähmt". Die Wasserstoffatome, die in $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 herantransportiert werden, werden in Elektronen und Protonen (H^+) zerlegt. Die Elektronen werden über eine Elektronentransportkette stufenweise auf den eingeatmeten Sauerstoff übertragen. Bei jeder Stufe wird eine kleine Energiemenge freigesetzt. Diese Energie wird in einem Zwischenschritt gespeichert und dann verwendet, um ATP herzustellen. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese stufenweise Energiefreisetzung.

Sequenz 1

Einleitungsseite

Die stufenweise Energiefreisetzung erfordert in den Mitochondrien spezielle Strukturen: Die Atmungskette

Die schrittweise Oxidation des Wasserstoffes findet an der inneren Mitochondrienmembran statt. Hier sind Proteinkomplexe der Atmungskette eingebettet, die den schrittweisen Elektronentransport ermöglichen. In dieser Membran befindet sich auch der Proteinkomplex, der ATP herstellt. ATP ist ein Reaktionsprodukt der Atmungskette.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Die Atmungskette

Die Atmungskette ermöglicht eine schrittweise Elektronenübertragung von Wasserstoff auf Sauerstoff und damit eine kontrollierte Freisetzung der Reaktionsenergie. Diese wird bei den Elektronenübertragungen an den Komplexen I, III und IV frei. Ubichinon und Cytochrom c sind mobile Elektronenüberträger, die den Elektronentransport zwischen diesen Komplexen vermitteln.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronenaufnahme und -abgabe am Komplex I

NADH + H⁺ (aus Glycolyse und Zitronensäurezyklus) übergibt 2 Elektronen und 2 Protonen an Komplex I. Dabei wird NAD⁺ in der Mitochondrienmatrix freigesetzt. Der Komplex I gibt die aufgenommenen Elektronen und Protonen an Ubichinon ab. Es diffundiert in der Membran zum Komplex III.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Komplex I pumpt Protonen (H⁺)

Zeitgleich mit dem Elektronentransport werden durch den Komplex I 4 Protonen aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gepumpt.

Sequenz 2

Einleitung

Betrachten Sie nun den Weg der Elektronen an Komplex III und IV.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronentransport zum Komplex III

Ubichinon diffundiert durch die Membran vom Komplex I zum Komplex III und gibt zwei Elektronen und zwei Protonen an ihn ab.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Das erste Elektron wird zum Komplex IV transportiert

Ein Elektron wird vom Komplex III auf Cytochrom c übertragen. Cytochrom c bewegt sich an der Außenseite der Membran zum Komplex IV und gibt das Elektron ab. Gleichzeitig bindet der Komplex IV ein Sauerstoffmolekül.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Das zweite Elektron wird zum Komplex IV transportiert

Cytochrom c bewegt sich zurück zum Komplex III und übernimmt das zweite Elektron. Auch dieses Elektron wird auf Komplex IV übertragen. Zeitgleich mit der Elektronenübergabe an Cytochrom c pumpt Komplex III die zwei Protonen, die er vom Ubichinon erhalten hat, und zwei weitere Protonen aus der Matrix in den Intermembranraum.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Komplex IV überträgt 2 Elektronen auf Sauerstoff und transportiert Protonen

Komplex IV überträgt die beiden Elektronen auf das Sauerstoffmolekül. Der Sauerstoff bleibt am Komplex IV gebunden. Gleichzeitig mit der Elektronenübertragung pumpt Komplex IV 2 Protonen von der Matrix in den Intermembranraum.

Sequenz 3

Einleitung

Sind zwei Elektronen auf ein Molekül Sauerstoff übertragen worden, wird die gesamte Atmungskette von zwei weiteren Elektronen durchlaufen.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Sauerstoff erhält zwei weitere Elektronen

Ein weiteres $\text{NADH} + \text{H}^+$ gibt zwei Elektronen an Komplex I ab, die die Atmungskette durchlaufen. Komplex IV überträgt dieses dritte und vierte Elektron nacheinander auf Sauerstoff. Während des Elektronentransports werden am Komplex I 4 Protonen (H^+) aus der Matrix in den Intermembranraum gepumpt. Am Komplex III werden 2 Protonen vom Ubichinon und 2 Protonen aus der Matrix in den Intermembranraum befördert.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Protonentransport am Komplex IV

Komplex IV überträgt das dritte und vierte Elektron auf Sauerstoff. Dabei werden zwei Protonen von der Matrix in den Intermembranraum gepumpt.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Wasserbildung

Bei der Übertragung des dritten und vierten Elektrons auf Sauerstoff werden außerdem jeweils 2 Protonen (2H^+) aus der Matrix aufgenommen. Diese vier Protonen bilden mit dem Sauerstoff und den vier Elektronen zwei Wassermoleküle, die in der Mitochondrienmatrix freigesetzt werden.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Membranpotential

Durch den Transport von Protonen von der Matrix in den Intermembranraum wird ein Konzentrationsgradient für Protonen aufgebaut. Dieses führt zu einer Anhäufung von positiven Ladungen im Intermembranraum. Infolgedessen lädt sich die eine Seite der Membran positiv, die andere Seite negativ auf. Diese Ladungsdifferenz bezeichnet man als Membranpotential. Das Membranpotential ist neben dem Konzentrationsgefälle die treibende Kraft für die ATP-Synthese.

Sequenz 4

Einleitung

Endstation der Atmungskette

Die Energie wird in ATP gespeichert. Diese Speicherung geschieht durch das Eiweiß ATP-Synthase, die in den Abbildungen ganz rechts in die Membran gezeichnet wurde.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Protonengradient

Wenn Elektronen aus $\text{NADH} + \text{H}^+$ die Atmungskette durchlaufen, werden an den Proteinkomplexen Protonen gegen ihr Konzentrations- und Ladungsgefälle aus der Matrix in den Intermembranraum gepumpt. Dieser Protonengradient dient als vorläufiger Energiespeicher, der jetzt zur ATP-Synthese genutzt wird.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ADP und P_i

ADP und P_i lagern sich an dem Köpfchen der ATP-Synthase an.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ATP-Bildung

Es entsteht ATP.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ATP-Freisetzung

Zur Freisetzung von ATP ist Energie notwendig. 3 Protonen fließen entlang ihres Konzentrations- und Ladungsgefälles durch den Membranteil der ATP-Synthase vom Intermembranraum in die Matrix zurück. Die dabei freiwerdende Energie ermöglicht die Freisetzung von ATP in die Matrix.

Infoseite

Woher kommen nun die Protonen, die von den Komplexen transportiert werden, um den Protonengradienten aufzubauen? Das Wasser in der Zelle zerfällt zu einem ganz kleinen Teil in H^+ und OH^- . Diese Protonen (H^+ -Teilchen) werden von den Eiweißkomplexen aus der Matrix des Mitochondriums in den Intermembranraum gepumpt. Die Energie, die bei jedem Teilschritt des Elektronentransports frei wird, wird durch den Protonentransport sozusagen gespeichert. Es entsteht ein Protonengradient. Gleichzeitig entsteht durch den Transport der vielen positiven Ladungen in dem Intermembranraum eine Ladungsdifferenz. Die ATP-Synthase nutzt diesen Protonengradienten und die Ladungsdifferenz, um ATP zu synthetisieren.

Zusatzmaterial

Einleitung

Komplex II (Succinat-Dehydrogenase) ist das einzige Enzym des Zitronensäurezyklus, das in der inneren Mitochondrienmembran platziert ist. Durch den Komplex II werden über das FADH₂ Elektronen in die Atmungskette eingespeist.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Komplex II

Vom FADH₂ werden 2 Elektronen über den Komplex II und 2 Protonen auf Ubichinon übertragen. FAD bleibt nach der Elektronenabgabe am Komplex II gebunden. Protonen werden bei dieser Übertragung am Komplex II nicht gepumpt.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Komplex III und IV

Der weitere Transport der FADH₂-Elektronen verläuft wie der Transport von NADH + H⁺-Elektronen.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

2 weitere Elektronen werden auf Sauerstoff übertragen

Um die Reaktion mit der Bildung zweier Wassermoleküle abzuschließen, müssen 2 weitere Elektronen vom FADH₂ auf Sauerstoff übertragen werden.

4.2.2 Studie 3 (Fotosynthese): Standbild und Animation

Einleitung 1

Wenn Glucose abgebaut wird, entsteht Energie. Fotosynthese ist die Umkehrung dieses Prozesses. Energie wird also gebraucht, um Glucose herzustellen. Dieser Unterrichtsabschnitt klärt, wie Energie aus Sonneneinstrahlung in chemische Energie umgewandelt und zum Aufbau von Glucose in der Zelle genutzt wird.

Die Reaktionen der Fotosynthese

Die Reaktionen der Fotosynthese finden an den Thylakoidmembranen und im Stroma der Chloroplasten statt. Die folgende Abbildung zeigt Ihnen eine zusammenfassende Übersicht dieser Reaktionen. Um nähere Informationen zu Abbildungen zu erhalten, klicken Sie auf den folgenden Seiten diesen Button oder die Hotwords (alle **rot** hervorgehobenen Wörter)

Ihre Aufgabe ist es, sich zunächst einen Überblick über die Reaktionen der Fotosynthese zu verschaffen.

Viewer (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Arbeitsteilung im Chloroplasten

Bei der Fotosynthese wird Sonnenenergie in energiereichen Molekülen wie Glucose gespeichert. Daran sind die Primärreaktionen und die Sekundärreaktionen beteiligt. Die Primärreaktionen finden an den Thylakoidmembranen und die Sekundärreaktionen im Stroma des Chloroplasten statt. Mit den Primärreaktionen werden an den Thylakoidmembranen $\text{NADPH} + \text{H}^+$ und ATP gebildet. Ausgangsstoffe hierfür sind NADP^+ und $\text{ADP} + \text{P}_i$. Dieser Prozess benötigt Energie, die durch Licht bereitgestellt wird. NADP^+ wird durch Aufnahme von 2 Elektronen und 2 Protonen zu $\text{NADPH} + \text{H}^+$ reduziert. Die Elektronen stammen letztendlich aus Wassermolekülen (H_2O), die an den Thylakoidmembranen in Sauerstoff (O_2), Elektronen und Protonen gespalten werden. Sauerstoff (O_2) ist damit ein weiteres Reaktionsprodukt der Primärreaktionen. Mit den Sekundärreaktionen im Stroma des Chloroplasten wird aus Kohlendioxid (CO_2), $\text{NADPH} + \text{H}^+$ und Wasser (H_2O) schrittweise unter Energieverbrauch Glucose aufgebaut. In einem Reaktionskreislauf wird CO_2 an ein vorhandenes Zuckermolekül (= CO_2 -Akzeptor) geknüpft und durch die Reaktion mit $\text{NADPH} + \text{H}^+$ reduziert. Anschließend wird der CO_2 -Akzeptor in mehreren Reaktionsschritten wiederhergestellt. Diese benötigen Energie, die von ATP bereitgestellt wird. Um ein Molekül Glucose aufzubauen, muss dieser Reaktionskreislauf insgesamt sechsmal durchlaufen werden.

Einleitung 2

Die Primärreaktionen der Fotosynthese im Detail

Wie aber werden Sauerstoff, $\text{NADPH} + \text{H}^+$ und ATP aus Wasser, NADP^+ und ADP an den Thylakoidmembranen gebildet? Welche Rolle spielt die Lichtenergie dabei? Das Prinzip der ATP-Gewinnung ist Ihnen bereits aus der Atmungskette bekannt: Die Energie eines Elektronentransports wird zum Aufbau eines Protonengradienten genutzt, der die ATP-Synthese antreibt. Die folgende Abbildung zeigt Ihnen die Proteine in der Thylakoidmembran, die am fotosynthetischen Elektronentransport und an der ATP-Synthese beteiligt sind.

Viewer (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Die Proteine der Thylakoidmembran

Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese werden Elektronen aus Wassermolekülen auf NADP^+ übertragen. An der Elektronenübertragung sind die Fotosysteme und der Cytochrom-Komplex beteiligt. Das fettähnliche Plastochinon und das mobile Protein Plastocyanin vermitteln den Transport zwischen den Fotosystemen und dem Cytochrom-Komplex. Ferredoxin überträgt die Elektronen auf NADP^+ . Die Energie, die für den Elektronentransport erforderlich ist, wird durch Licht bereitgestellt.

Sequenz 1

Einleitung

Lernen Sie jetzt Schritt für Schritt die Primärreaktionen an den Thylakoidmembranen kennen. Los geht's mit den Reaktionen am Fotosystem II.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

1. Anregung des Fotosystems II

Durch Lichtenergie wird ein Elektron so angeregt, dass es genügend Energie besitzt, um ein Chlorophyllmolekül im Reaktionszentrum zu verlassen. Das Elektron wird auf einen Elektronenakzeptor im Fotosystem II übertragen. Es hinterlässt im Chlorophyllmolekül eine Elektronenlücke (+).

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Wasserspaltung

Am Fotosystem II befindet sich der wasserspaltende Apparat. Dieser nimmt 4 Elektronen von 2 Wassermolekülen (H_2O) auf. Dabei werden 4 Protonen und 1 Molekül Sauerstoff (O_2) im Thylakoidlumen freigesetzt. Ein Elektron aus der Wasserspaltung füllt die entstandene Elektronenlücke (+) im Chlorophyllmolekül auf.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

2. Anregung des Fotosystems II

Das Chlorophyllmolekül im Reaktionszentrum des Fotosystems II wird abermals angeregt und überträgt wieder ein Elektron auf einen Elektronenakzeptor im Fotosystem II. Die entstandene Elektronenlücke im Chlorophyllmolekül wird durch Aufnahme eines weiteren Elektrons vom Wasserspaltungsapparat geschlossen.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronenabgabe am Fotosystem II

Plastochinon erhält zwei Elektronen vom Elektronenakzeptor im Fotosystem II. Es nimmt zusätzlich zwei Protonen aus dem Stroma auf.

Sequenz 2

Einleitung

Betrachten Sie nun die Reaktionen am Cytochrom-Komplex.

Hier ist der Elektronentransport mit einem Protonentransport verbunden.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronentransport zum Cytochrom-Komplex

Plastochinon bewegt sich in der Thylakoidmembran mit den zwei Elektronen und Protonen zum Cytochrom-Komplex. Die beiden Elektronen und Protonen werden auf den Komplex übertragen.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronenabgabe am Cytochrom-Komplex

Der Cytochrom-Komplex gibt ein Elektron an Plastocyanin weiter.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Der Cytochrom-Komplex pumpt Protonen

Das zweite Elektron wird auf ein weiteres Plastocyanin übertragen. Bei diesem Elektronentransport wird Energie frei. Sie wird dazu genutzt, die zwei Protonen, die der Komplex vom Plastochinon erhalten hat, und zwei weitere Protonen aus dem Stroma gegen den Konzentrationsgradienten ins Thylakoidlumen zu befördern.

Sequenz 3

Einleitung

Der nächste Abschnitt zeigt den Weg der Elektronen vom Fotosystem I zum NADP⁺. Hier wird NADPH+H⁺ für die Sekundärreaktionen der Fotosynthese gebildet.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

1. Anregung des Fotosystems I

Durch Lichtenergie wird ein Elektron so angeregt, dass es genügend Energie besitzt, um ein Chlorophyllmolekül im Reaktionszentrum zu verlassen. Das Elektron wird auf Ferredoxin übertragen. Es hinterlässt im Chlorophyllmolekül eine Elektronenlücke.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Die Elektronenlücke am Fotosystem I wird geschlossen

Plastocyanin bewegt sich an der Lumenseite der Thylakoidmembran zum Fotosystem I und vermittelt so den Elektronentransport zwischen den beiden Proteinkomplexen. Ein Elektron vom Plastocyanin füllt die entstandene Elektronenlücke (+) im Chlorophyllmolekül am Fotosystem I auf.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

2. Anregung des Fotosystems I

Abermals wird ein Elektron im Reaktionszentrum des Fotosystems I angeregt und auf ein weiteres Ferredoxin übertragen. Die entstandene Elektronenlücke wird durch die Aufnahme eines Elektrons vom Plastocyanin geschlossen.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Bildung von $\text{NADPH} + \text{H}^+$

Die 2 Elektronen von den beiden Ferredoxinmolekülen werden mit 2 Protonen aus dem Stroma auf NADP^+ übertragen. Ein $\text{NADPH} + \text{H}^+$ wird gebildet.

Sequenz 4

Einleitung

Bei der Spaltung von 2 Wassermolekülen wurden am Fotosystem II 4 Elektronen abgegeben. 2 von diesen Elektronen wurden über die fotosynthetische Elektronentransportkette auf ein NADP^+ übertragen. Die folgende Abbildung zeigt Ihnen nochmals den gesamten Ablauf für die 2 Elektronen, die sich jetzt noch am Fotosystem II befinden.

Viewer (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Ein weiteres $\text{NADPH} + \text{H}^+$ wird gebildet

Am Wasserspaltungsapparat wurden 2 Wassermoleküle in 4 Elektronen, 4 Protonen und 1 Molekül Sauerstoff zerlegt. Die Protonen und der Sauerstoff wurden in das Thylakoidlumen abgegeben. Die zwei übrigen Elektronen durchlaufen jetzt die Elektronentransportkette und bilden im Stroma mit NADP^+ und zwei Protonen ein weiteres $\text{NADPH} + \text{H}^+$. Dabei werden am Cytochrom-Komplex 4 weitere Protonen (2 vom Plastochinon und 2 aus dem Stroma) in das

Thylakoidlumen befördert. Dies führt zum Aufbau eines Konzentrationsgradienten für Protonen, der wie bei der Atmungskette zur ATP-Synthese genutzt wird.

Sequenz 5

Einleitung

Bei dem Elektronentransport werden gleichzeitig Protonen in den Raum zwischen den Membranen gepumpt. Es entsteht wie bei der Atmungskette ein Protonengradient. Die folgenden Abbildungen zeigen Ihnen, wie dieser Protonengradient zur ATP-Synthese ausgenutzt wird. Diese Vorgänge unterscheiden sich nicht von denen in der Atmungskette.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Protonengradient über der Thylakoidmembran

Im Verlauf der Primärreaktionen der Fotosynthese wird ein Protonengradient über der Thylakoidmembran aufgebaut. Durch folgende Reaktionen wird die Protonenkonzentration im Thylakoidlumen erhöht bzw. im Stroma verringert:

1. Wasserspaltung: Aus 2 Wassermolekülen werden 4 Protonen im Thylakoidlumen freigesetzt.
2. Protonentransport am Cytochrom-Komplex: Zusätzlich werden insgesamt 8 Protonen aus dem Stroma in das Thylakoidlumen befördert, wenn 4 Elektronen aus 2 Wassermolekülen die fotosynthetische Elektronentransportkette durchlaufen.
3. Bildung von $\text{NADPH}+\text{H}^+$: Bei der Bildung von zwei $\text{NADPH}+\text{H}^+$ werden 4 Protonen aus dem Stroma gebunden.

Dieser Protonengradient dient als vorläufiger Energiespeicher, der wie bei der Atmungskette zur ATP-Synthese genutzt wird.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ADP und P_i

ADP und P_i lagern sich an dem Köpfchen der ATP-Synthase an.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ATP-Bildung

Es entsteht ATP.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

ATP-Freisetzung

Zur Freisetzung von ATP ist Energie notwendig. 3 Protonen fließen entlang ihres Konzentrationsgradienten durch den Membranteil der ATP-Synthase vom Thylakoidlumen ins Stroma zurück. Die dabei freiwerdende Energie ermöglicht die Freisetzung von ATP ins Stroma.

Zusatzmaterial

Einleitung

Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese werden Elektronen, die letztendlich aus Wassermolekülen stammen auf NADP^+ übertragen. Man bezeichnet diesen Elektronentransportweg auch als nicht-zyklische Elektronenbewegung. Neben dieser gibt es auch eine *zyklische Elektronenbewegung*, bei der die Elektronen vom Ferredoxin stammen und wieder auf Ferredoxin übertragen werden. $\text{NADPH} + \text{H}^+$ wird bei der zyklischen Elektronenbewegung nicht gebildet. Der nächste Abschnitt zeigt Ihnen die zyklische Elektronenbewegung.

Viewer 1 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Mit zwei Elektronen von 2 Molekülen Ferredoxin startet der zyklische Elektronentransport.

Viewer 2 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Zyklischer Elektronentransport

2 Moleküle Ferredoxin übertragen ihre Elektronen auf Plastochinon. Dabei nimmt Plastochinon zusätzlich 2 Protonen aus dem Stroma auf.

Viewer 3 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Elektronentransport zum Ferredoxin

Der weitere Transport der Elektronen und Protonen am Cytochrom-Komplex und am Fotosystem I verläuft wie bei der nicht-zyklischen Elektronenbewegung. Die zyklische Elektronenbewegung endet mit der Übertragung zweier Elektronen auf 2 Moleküle Ferredoxin.

Viewer 4 (über speziellen Button abrufbares Informationsfeld)

Fotosystem I

Um die zyklische Elektronenbewegung zu vollenden, müssen zwei Elektronen auf 2 Moleküle Ferredoxin übertragen werden.

Der Elektronentransport zum Ferredoxin unterscheidet sich nicht vom nicht-zyklischen Elektronentransport.

5 INSTRUKTIONALE HILFESTELLUNGEN

Die instruktionalen Hilfestellungen zu den verschiedenen Lernprogrammen sind als separate PDF-Dateien von derselben Internetseite abzurufen wie die Dissertation und ihr Anhang.

Nähere Informationen hierzu sind außerdem unter den folgenden Adressen erhältlich:

Claudia Nerdel, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN),
Abt. Didaktik der Biologie, Olshausenstraße 62, 24098 Kiel, nerdel@ipn.uni-kiel.de

oder auch

http://www.ipn.uni-kiel.de/abt_bio/persons/nerdel/nerdel.htm

(Stand: Mai 2003)

5.1 Studie 1 (Biomembranen)

Version	Datei
Gemeinsames Lernprogramm	Nerdel_Studie1_IH_Biomembranen.pdf

5.2 Studie 2 (Atmungskette)

Version	Datei
Standbild, Animation und Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	Nerdel_Studie2_IH1_Atमungskette.pdf
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	Nerdel_Studie2_IH2_Atमungskette.pdf

5.3 Studie 3 (Fotosynthese)

Version	Datei
alle Versionen	Nerdel_Studie3_IH_Fotosynthese.pdf

6 FRAGEBÖGEN

6.1 Biomembranen Vortest:

Computerkenntnisse, Lernpräferenz

		trifft nicht zu	trifft etwas zu	trifft ziemlich zu	trifft völlig zu
1	Ich denke oft in Bildern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Ich lese sehr langsam.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Wenn ich mich an eine Szene erinnere, denke ich eher in Worten als in Bildern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Ich finde es schwierig, mir etwas bildlich vorzustellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Ich habe schon oft mit Lernprogrammen gearbeitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Ich weiß eine ganze Menge über Computer.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Ich arbeite sehr häufig mit dem Computer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Das Lernen am Computer finde ich nicht gerade interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Das Lernen am Computer habe ich noch nie gemocht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Das Lernen am Computer finde ich anregend und spannend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6.2 Studie 1 (Biomembranen) Nachtest:

Kognitive Belastung, Motivation

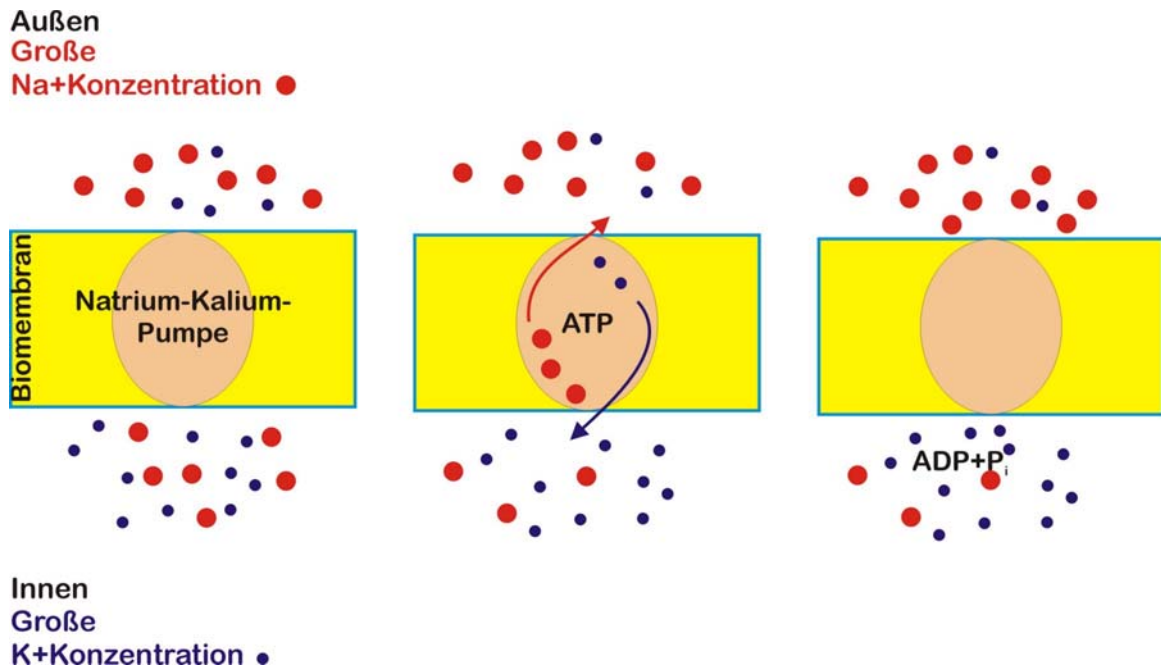
1	War das Lernprogramm für Sie eher zu leicht oder eher zu schwer?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		viel zu leicht		genau richtig		viel zu schwer
2	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		viel zu einfach		genau richtig		viel zu komplex
3	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr gut
4	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr
5	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr
6	Wie würde es Ihnen gefallen, mit dem Lernprogramm in Ihrer Freizeit zu lernen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr gut
7	Wie sehr würden Sie das Lernen mit dem Lernprogramm ihren Freunden empfehlen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr
8	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem
9	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr gut
10	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem
11	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				sehr aufmerksam
12	Fühlten Sie sich durch die Informationsfülle des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem überlastet
13	Fühlten Sie sich durch die Komplexität (Auswahlmöglichkeiten, komplizierte Inhalte) des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem überlastet
14	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem häufig
15	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		gar nicht				extrem häufig

6.3 Wissenstest zu Studie 1 (Biomembranen)

1. Unter Diffusion versteht man
 - den Transport von Teilchen gegen ihren Konzentrationsgradienten über eine Biomembran.
 - die Verteilung von Teilchen über den gesamten zur Verfügung stehenden Raum.
 - das Ablösen eines Protoplasten von der Zellwand, wenn die Zelle einer hypertotonischen Lösung ausgesetzt wird.
 - den Transport von Teilchen über eine Biomembran mit Hilfe eines Carriers.
2. Biomembranen bestehen aus ... und enthalten ...
 - einer einfachen Schicht Phospholipide, Membranproteine
 - Glykoproteinen, Lipide
 - einer doppelten Schicht Phospholipide, Membranproteine
 - Cholesterin, Hämoglobin
3. Welches der folgenden Moleküle kann am wahrscheinlichsten frei durch eine Biomembran diffundieren, ohne die Beteiligung eines Transportproteins
 - CO₂
 - Glucose
 - Na⁺
 - DNA
4. Kennzeichnen Sie die passiven Transportsysteme in Biomembranen.
 - Diffusion, Osmose, Plasmolyse
 - Diffusion, Transport durch eine Transport-ATPase, erleichterte Diffusion durch Carrier
 - Endocytose, Osmose, Konservendose
 - Diffusion, Diffusion durch Kanalproteine, erleichterte Diffusion durch Carrier.
5. Aktiver Transport...
 - ist bei der erleichterten Diffusion von Bedeutung
 - bedeutet, dass ein Fett mit einem Trägermolekül verbunden ist
 - erfordert ATP-Energie
 - wird erreicht, indem CO₂ sich an Hämoglobin bindet.
6. Kennzeichnen Sie aktive Transportsysteme.
 - Diffusion
 - Transport durch Carrier entlang eines Konzentrationsgradienten
 - Transport mittels eines Transportproteins unter ATP-Verbrauch
 - Transport zweier Stoffe über eine Biomembran. Der eine wird gegen seinen Konzentrationsgradienten, der andere in Richtung seines Konzentrationsgradienten transportiert.

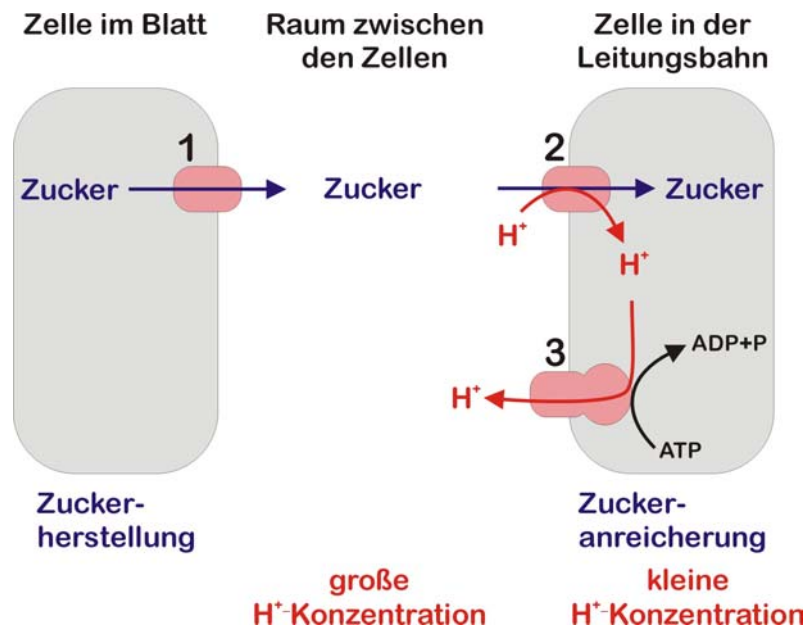
7. Welche Rolle spielt der Konzentrationsgradient beim aktiven und passiven Transport über eine Membran?
8. Worin unterscheiden sich primär und sekundär aktiver Transport?
9. Die Natrium-Kalium-Pumpe ist ein weitverbreitetes Transportsystem in tierischen Zellmembranen. Die Abbildung zeigt die Arbeitsweise dieser Pumpe.

Erläutern Sie, warum es sich bei der Natrium-Kalium-Pumpe um einen aktiven Transport handelt.



10. Pflanzen können in den Blättern Zucker zu ihrer Ernährung selber herstellen. Um andere Pflanzenteile, wie zum Beispiel die Wurzel mit Zuckern zu versorgen, werden diese Nährstoffe in Leitungsbahnen angereichert und von dort zu den anderen Pflanzenteilen transportiert. Die Abbildung zeigt den Transportweg eines Zuckers von einer Blatzelle in die Zellen der Leitungsbahnen.

Benennen Sie die unter 1, 2 und 3 aufgeführten Transportsysteme. Begründen Sie ihre Entscheidung.



6.4 Studie 2 (Atmungskette) Vortest: Computerkenntnisse, Lernpräferenz

		trifft nicht zu	trifft etwas zu	trifft ziemlich zu	trifft völlig zu
1	Das Lernen am Computer habe ich noch nie gemocht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Das Lernen am Computer finde ich anregend und spannend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Ich denke oft in Bildern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Ich weiß eine ganze Menge über Computer.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Ich lese sehr langsam.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Das Lernen am Computer finde ich nicht gerade interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Ich arbeite sehr häufig mit dem Computer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Ich habe schon oft mit Lernprogrammen gearbeitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6.5 Studie 2 (Atmungskette) Nachtest:

Kognitive Belastung, Motivation

1	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem häufig
2	Wie sehr würden Sie das Lernen mit dem Lernprogramm ihren Freunden empfehlen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
3	War das Lernprogramm für Sie eher zu leicht oder eher zu schwer?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	viel zu leicht		genau richtig			viel zu schwer
4	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
5	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
6	Fühlten Sie sich durch die Informationsfülle des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem überlastet
7	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr aufmerksam
8	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem häufig
9	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
10	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem
11	Wie würde es Ihnen gefallen, mit dem Lernprogramm in Ihrer Freizeit zu lernen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
12	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	viel zu einfach		genau richtig			viel zu komplex
13	Fühlten Sie sich durch die Komplexität (Auswahlmöglichkeiten, komplizierte Inhalte) des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem überlastet
14	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
15	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem

6.6 Wissenstest zur Studie 2 (Atmungskette)

1. Mit den Reaktionen der Atmungskette gewinnen Lebewesen Energie. Welche chemische Reaktion gibt diese Energie ab?
 - Die Reaktion von Glucose mit Sauerstoff
 - Die Reaktion von Glucose mit Wasserstoff
 - Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff
 - Die Reaktion von Sauerstoff mit ADP
2. $\text{NADH} + \text{H}^+$ lagert sich an den Komplex I an. Was geschieht weiter an diesem Komplex?
 - $\text{NADH} + \text{H}^+$ gibt nur Protonen ab
 - $\text{NADH} + \text{H}^+$ gibt nur Elektronen ab
 - $\text{NADH} + \text{H}^+$ gibt ein Proton und ein Elektron ab
 - $\text{NADH} + \text{H}^+$ gibt zwei Protonen und zwei Elektronen ab
3. Die Komplexe I, III und IV der Atmungskette geben Elektronen weiter. Was geschieht noch an diesen drei Komplexen?
 - An allen drei Komplexen wird Wasser gebildet
 - An allen drei Komplexen werden Protonen in den Intermembranraum gepumpt
 - An allen drei Komplexen entsteht ATP
 - An Komplex I lagert sich Sauerstoff an
4. Wie viele Protonen wandern aus dem Intermembranraum zurück in die Matrix, wenn ein ATP freigesetzt wird?
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
5. Wie viele Wassermoleküle entstehen für 4 $\text{NADH} + \text{H}^+$, die ihre Elektronen an die Atmungskette abgeben?
 - 2
 - 3
 - 4
 - 6
6. Warum muss die Atmungskette für die Wasserbildung mehrmals durchlaufen werden?
 - Ein O_2 braucht vier Elektronen von 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$
 - Ein O_2 braucht zwei Elektronen von 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$
 - Ein O_2 braucht zwei Elektronen von 1 $\text{NADH} + \text{H}^+$
 - Ein O_2 braucht vier Elektronen von 3 $\text{NADH} + \text{H}^+$

7. Warum wird Sauerstoff (O_2) verbraucht, wenn die Atmungskette abläuft?
- Aus Elektronen, Protonen und Sauerstoff wird Wasser gebildet
 - Aus Sauerstoff wird ATP hergestellt
 - Sauerstoff liefert die Energie, um Protonen zu pumpen
 - $NADH+H^+$ verbindet sich mit Sauerstoff
8. Was müsste man in den Intermembranraum zugeben, damit ATP synthetisiert werden kann, ohne dass die Atmungskette abläuft?
- Elektronen
 - $NADH+H^+$
 - Protonen
 - O_2
9. Die Substanz A unterbindet die ATP-Bildung während der Atmungskette. Die Elektronenübertragung auf O_2 und der Aufbau des Protonengradienten werden nicht beeinträchtigt. Nennen Sie einen möglichen Angriffspunkt für A!
- Komplex I
 - $NADH+H^+$
 - ATP-Synthase
 - Cytochrom c
10. Die Substanz B unterbindet den Elektronenfluss von Ubichinon zum Komplex III. Welchen Einfluss hat B auf die Elektronenübertragung auf O_2 und die mitochondriale ATP-Bildung?
- die Elektronenübertragung auf O_2 läuft weiter, die ATP-Bildung wird behindert
 - die Elektronenübertragung auf O_2 wird behindert, die ATP-Bildung läuft weiter
 - die Elektronenübertragung auf O_2 läuft weiter, die ATP-Bildung wird gesteigert
 - der Elektronentransport und die ATP-Bildung werden behindert
11. Substanz E macht die innere Mitochondrienmembran durchlässig für Protonen. Welche Wirkungen hat Substanz E auf den Ablauf der Atmungskette und die ATP-Synthese?
- die Wasserbildung wird vermindert
 - der Sauerstoffverbrauch wird vermindert
 - die ATP-Synthese wird vermindert
 - keine
12. Bei allen Stoffwechselprozessen entsteht Wärme. Dies gilt auch für die Atmungskette in den Mitochondrien. Winterschläfer wie Fledermäuse oder Zwerghamster besitzen besondere Fettzellen, in deren Mitochondrien auf diese Weise Wärme erzeugt wird, ohne dass dabei ATP entsteht. Wo und wie muss ein spezielles Protein X an der inneren Mitochondrienmembran wirken, um dies zu ermöglichen?
- das Protein X muss an Komplex IV die Elektronenübertragung auf Sauerstoff verhindern
 - das Protein X muss die innere Mitochondrienmembran durchlässig für Protonen machen
 - das Protein X muss an den Komplexen I,III und IV den Protonentransport blockieren
 - das Protein X muss an der ATP-Synthase den Protonenfluss blockieren

13. Durch die ATPase-Aktivität wird in der Mitochondrienmatrix ATP angereichert. Als Energielieferant wird es aber im Cytoplasma der Zelle außerhalb des Mitochondriums gebraucht. Dazu muss es zunächst von der Matrix in den Intermembranraum gelangen. Hierfür gibt es in der inneren Mitochondrienmembran ein Transportprotein, das ATP aus der Matrix in den Intermembranraum und zugleich ADP aus dem Intermembranraum in die Matrix transportiert. ATP ist vierfach negativ elektrisch geladen (ATP^{4-}), ADP dreifach negativ (ADP^{3-}). Wie wirken sich der ATP-Konzentrationsgradient und das Membranpotential der inneren Mitochondrienmembran auf die Aktivität des Transportproteins aus? Bedenken Sie, dass sich gleiche Ladungen abstoßen.

- ATP wird aufgrund seiner Ladung und seines Konzentrationsgradienten passiv in den Intermembranraum transportiert
- ATP muss unter Energieaufwand in den Intermembranraum transportiert werden
- ATP kann aufgrund des Konzentrationsgradienten von ADP zusammen mit diesem in den Intermembranraum transportiert werden
- Aufgrund des Membranpotentials der inneren Mitochondrienmembran findet kein Transport von ATP statt

6.7 Studie 3 (Fotosynthese) Vortest: Computerkenntnisse, Lernpräferenz

		trifft nicht zu	trifft etwas zu	trifft ziemlich zu	trifft völlig zu
1	Das Lernen am Computer habe ich noch nie gemocht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Das Lernen am Computer finde ich anregend und spannend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Ich denke oft in Bildern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Ich weiß eine ganze Menge über Computer.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Ich lese sehr langsam.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Das Lernen am Computer finde ich nicht gerade interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Ich arbeite sehr häufig mit dem Computer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Ich habe schon oft mit Lernprogrammen gearbeitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6.8 Studie 3 (Fotosynthese) Nachtest:

Kognitive Belastung, Motivation

1	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem häufig
2	Wie sehr würden Sie das Lernen mit dem Lernprogramm ihren Freunden empfehlen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
3	War das Lernprogramm für Sie eher zu leicht oder eher zu schwer?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	viel zu leicht		genau richtig			viel zu schwer
4	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
5	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
6	Fühlten Sie sich durch die Informationsfülle des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem überlastet
7	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr aufmerksam
8	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem häufig
9	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr
10	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem
11	Wie würde es Ihnen gefallen, mit dem Lernprogramm in Ihrer Freizeit zu lernen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
12	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	viel zu einfach		genau richtig			viel zu komplex
13	Fühlten Sie sich durch die Komplexität (Auswahlmöglichkeiten, komplizierte Inhalte) des Lernprogramms geistig überlastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem überlastet
14	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					sehr gut
15	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gar nicht					extrem

6.9 Wissenstest zu Studie 3 (Fotosynthese)

1. Die Ausgangsstoffe für die Primärreaktionen der Fotosynthese sind:
 - Wasser, Sauerstoff, ADP
 - Kohlenstoffdioxid, NADP^+ , ADP
 - Wasser, NADP^+ , ADP
 - Wasser, $\text{NADPH}+\text{H}^+$, ATP
2. Produkte der Primärreaktionen in der Fotosynthese sind:
 - Sauerstoff, ATP, $\text{NADPH}+\text{H}^+$
 - Glucose und Wasser
 - Kohlendioxid und Sauerstoff
 - NADP^+ und ADP
3. Welche Reihe gibt den Elektronentransport während der Primärreaktionen der Fotosynthese richtig wieder?
 - Fotosystem I \rightarrow Fotosystem II \rightarrow NADP^+
 - Wasser \rightarrow Cytochrom-Komplex \rightarrow NADP^+
 - Fotosystem II \rightarrow Fotosystem I \rightarrow Sauerstoff
 - $\text{NADPH}+\text{H}^+$ \rightarrow Ubichinon \rightarrow Sauerstoff
4. Welche Voraussetzungen sind für die Primärreaktionen der Fotosynthese nicht erforderlich?
 - Lichtenergie, Chlorophyll
 - Wasser, NADP^+
 - Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff
 - ADP
5. Während der Primärreaktionen der Fotosynthese gibt das Wasser seine Elektronen unmittelbar ab an
 - Fotosystem I
 - Fotosystem II
 - Kohlenstoffdioxid
 - NADP^+
6. Der in der Fotosynthese freigesetzte Sauerstoff stammt aus:
 - Kohlenstoffdioxid
 - Kohlenstoffdioxid und Wasser
 - Glucose
 - Wasser

7. Woher kommen die Elektronen, die unmittelbar über das Ferredoxin auf NADP^+ übertragen werden?
- aus dem Fotosystem I
 - aus dem Wasser
 - aus dem Fotosystem II
 - aus dem Cytochrom-Komplex
8. Wie viele $\text{NADPH}+\text{H}^+$ entstehen pro Wassermolekül?
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
9. Wie viele Elektronen wandern insgesamt bezogen auf ein Molekül Sauerstoff durch die Proteine der Thylakoidmembran?
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
10. Eine zunehmende Protonenzahl kann man an einem sinkenden pH-Wert erkennen. Wie verändert sich der pH-Wert im Thylakoidinnenraum, wenn die Primärreaktionen der Photosynthese ablaufen?
- der pH-Wert wird größer
 - der pH-Wert wird kleiner
 - der pH-Wert bleibt gleich
11. Bei Dunkelheit nimmt der pH-Wert im Stroma des Chloroplasten von 8,2 auf 7,2 ab. Diese Erscheinung beruht darauf, dass ...
- im Stroma $\text{NADPH}+\text{H}^+$ gebildet wird
 - ATP gebildet wird, bis der Protonengradient abgebaut ist
 - am Fotosystem II Wasser gespalten wird
 - am Cytochrom-Komplex Protonen in den Thylakoidinnenraum befördert werden
12. Um Unkraut in seinem Garten zu vernichten, setzt ein Kleingärtner das Unkrautvernichtungsmittel DCMU (Dichlorphenoldimethylharnstoff) ein. Diese Verbindung verhindert Elektronenübertragung auf Plastochinon. Die Folgen davon sind
- $\text{NADPH}+\text{H}^+$ wird noch gebildet, ein Protonengradient wird nicht aufgebaut, die ATP-Synthese kommt zum Erliegen
 - Die Wasserspaltung am Fotosystem II findet nicht mehr statt, $\text{NADPH}+\text{H}^+$ und ATP werden noch gebildet
 - $\text{NADPH}+\text{H}^+$ wird nicht mehr gebildet, am Cytochrom-Komplex werden keine Protonen gepumpt, ATP wird nicht mehr gebildet
 - Die Wasserspaltung am Fotosystem II findet statt, ein Protonengradient wird aufgebaut, ATP wird gebildet.

13. Wodurch wird die Energie für den Elektronentransport bei der Atmungskette und bei den Primärreaktionen der Fotosynthese geliefert?
- Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert Licht die Energie für den Elektronentransport. Bei der Atmungskette reicht der Energiegehalt von $\text{NADH} + \text{H}^+$.
 - Bei der Atmungskette und bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert ein Protonengradient die Energie für den Elektronentransport.
 - Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese reicht der Energiegehalt von Wassermolekülen für den Elektronentransport aus. Bei der Atmungskette liefert $\text{NADH} + \text{H}^+$ die Energie.
 - Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert Licht die Energie für den Elektronentransport, bei der Atmungskette der Sauerstoff.
14. Vergleichen Sie die ATP-Bildung bei den Primärreaktionen der Fotosynthese mit der ATP-Bildung bei der Atmungskette. Wodurch wird die Energie geliefert, um ATP von der ATP-Synthase abzuspalten?
- Bei der Atmungskette und bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert nur ein Protonengradient die Energie.
 - Bei der Atmungskette liefert ein Protonengradient die Energie. Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese ist außerdem ein Membranpotential erforderlich.
 - Bei der Atmungskette liefern ein Protonengradient und ein Membranpotential die Energie. Bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert nur ein Protonengradient die Energie.
 - Bei der Atmungskette und bei den Primärreaktionen der Fotosynthese liefert ein Membranpotential die Energie.
15. Isolierte Chloroplasten und Mitochondrien werden in einem Experiment einem protonenreichen Medium ausgesetzt. Die Protonen können die äußere und innere Chloroplastenhüllmembran passieren. Bei den Mitochondrien gelangen die Protonen nur in den Intermembranraum. Welches der Organellen stellt unter diesen Bedingungen ATP her?
- der Chloroplast
 - das Mitochondrium
 - der Chloroplast und das Mitochondrium
 - weder der Chloroplast, noch das Mitochondrium

7 WEITERE ERGEBNISSE

7.1 Studie 2 (Atmungskette)

7.1.1 Fertig geworden?

Tabelle IX-1: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten.

Experimentalgruppe	Fertig geworden?			Gesamt
	Nein [N]	Ja [N]	Keine Angabe [N]	
Standbild	8	20	–	28
Animation	10	17	–	27
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	24	14	1	39
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	27	10	–	37
Gesamt	69	61	1	131

Tabelle IX-2: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten in Prozent.

Experimentalgruppe	Fertig geworden?			Gesamt
	Nein [%]	Ja[%]	Keine Angabe [%]	
Standbild	28,6%	71,4%	–	100,0%
Animation	37,0%	63,0%	–	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	61,5%	35,9%	2,6%	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	73,0%	27,0%	–	100,0%
Gesamt	52,7%	46,6%	0,8%	100,0%

7.1.2 Clusteranalyse zum Vorwissen: Verteilung auf die Treatments

Tabelle IX-3: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten.

Experimentalgruppe	Geringes Vorwissen [N]	Hohes Vorwissen [N]	Gesamt
Standbild	23	5	28
Animation	25	2	27
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	35	4	39
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	30	7	37
Gesamt	113	18	131

Tabelle IX-4: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten in Prozent.

Experimentalgruppe	Geringes Vorwissen [%]	Hohes Vorwissen [%]	Gesamt
Standbild	82,1%	17,9%	100,0%
Animation	92,6%	7,4%	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	89,7%	10,3%	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	81,1%	18,9%	100,0%
Gesamt	86,3%	13,7%	100,0%

7.1.3 Ergebnistabellen zur latenten Klassenanalyse

Tabelle IX-5: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Standbild“.

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachttest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Standbild“		Nachttest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	4	18	4	26
	Klasse 2 (Fakten)	–	1	1	2
	Klasse 3 (Köner)	–	–	–	–
Gesamt		4	19	5	28

Tabelle IX-6: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Animation“.

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachttest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Animation“		Nachttest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	2	18	7	27
	Klasse 2 (Fakten)	–	–	–	–
	Klasse 3 (Köner)	–	–	–	–
Gesamt		2	18	7	27

Tabelle IX-7: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“
 Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Zusammengefasste Gruppe „Simulationen“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	8	45	20	73
	Klasse 2 (Fakten)	–	2	1	3
	Klasse 3 (Köner)	–	–	–	–
	Gesamt	8	47	21	76

Tabelle IX-8: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung1“
 Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	5	22	11	38
	Klasse 2 (Fakten)	–	1	–	1
	Klasse 3 (Köner)	–	–	–	–
	Gesamt	5	23	11	39

Tabelle IX-9: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	3	23	9	35
	Klasse 2 (Fakten)	–	1	1	2
	Klasse 3 (Köner)	–	–	–	–
	Gesamt	3	24	10	37

7.2 Studie 3 (Primärreaktionen der Fotosynthese)

7.2.1 Fertig geworden?

Tabelle IX-10: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten.

Experimentalgruppe	Fertig geworden?		Gesamt
	Nein [N]	Ja [N]	
Standbild	11	19	30
Animation	10	20	30
Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	3	30	33
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	4	26	30
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	3	24	27
Gesamt	31	119	150

Tabelle IX-11: Stand der Bearbeitung der Lernprogramme am Ende der Lernsitzung
 Angegeben sind die Personenhäufigkeiten in Prozent.

Experimentalgruppe	Fertig geworden?		Gesamt
	Nein [%]	Ja [%]	
Standbild	36,7%	63,3%	100,0%
Animation	33,3%	66,7%	100,0%
Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	9,1%	90,9%	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	13,3%	86,7%	100,0%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	11,1%	88,9%	100,0%
Gesamt	20,7%	79,3%	100,0%

7.2.2 Clusteranalyse zum Vorwissen: Verteilung auf die Treatments

Tabelle IX-12: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen. Angegeben sind die Personenhäufigkeiten.

Experimentalgruppe	Geringes Vorwissen [N]	Hohes Vorwissen [N]	Gesamt
Standbild	21	9	30
Animation	22	8	30
Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	31	2	33
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	24	6	30
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	20	7	27
Gesamt	118	32	150

Tabelle IX-13: Verteilung der beiden Vorwissensgruppen (Cluster eingeteilt nach Faktenwissen im Vortest, Items 1-7) auf die vier Experimentalgruppen

Angegeben sind die Personenhäufigkeiten in Prozent.

Experimentalgruppe	Geringes Vorwissen [%]	Hohes Vorwissen [%]	Gesamt
Standbild	70%	30%	100%
Animation	73%	27%	100%
Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung	94%	6%	100%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1	80%	20%	100%
Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2	74%	26%	100%
Gesamt	79%	21%	100%

7.2.3 Ergebnistabellen zur latenten Klassenanalyse

Tabelle IX-14: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Standbild“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachttest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Standbild“		Nachttest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	12	3	6	21
	Klasse 2 (Fakten)	–	2	3	5
	Klasse 3 (Köner)	–	–	4	4
	Gesamt	12	5	13	30

Tabelle IX-15: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Animation“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Animation“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	10	7	5	22
	Klasse 2 (Fakten)	2	2	3	7
	Klasse 3 (Köner)	–	–	1	1
	Gesamt	12	9	9	30

Tabelle IX-16: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Zusammengefasste Gruppe „Simulationen“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	24	23	26	73
	Klasse 2 (Fakten)	–	6	7	13
	Klasse 3 (Köner)	1	–	3	4
	Gesamt	25	29	36	90

Tabelle IX-17: Kreuztabelle mit den absolute Häufigkeiten für die zusammengefasste Gruppe „Simulationen mit Instruktionen“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Zusammengefasste Gruppe „Simulationen mit instruktionalen Hilfestellungen“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	15	16	13	44
	Klasse 2 (Fakten)	–	5	5	10
	Klasse 3 (Köner)	1	–	2	3
	Gesamt	16	21	20	57

Tabelle IX-18: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Simulation mit minimaler instruktionaler Hilfestellung“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	9	7	13	29
	Klasse 2 (Fakten)	–	1	2	3
	Klasse 3 (Köner)	–	–	1	1
	Gesamt	9	8	16	33

Tabelle IX-19: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 1“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	7	7	7	21
	Klasse 2 (Fakten)	–	4	3	7
	Klasse 3 (Köner)	–	–	2	2
	Gesamt	7	11	12	30

Tabelle IX-20: Kreuztabellierung des Klassenwechsels für die Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“

Die Zeilen geben Auskunft über den Wissensstand zum ersten Messzeitpunkt (Vortest), während die Spalten die Zuordnung zu einer Klasse zum zweiten Messzeitpunkt (Nachtest) angeben. Einer Zelle sind die Personenhäufigkeiten zu entnehmen.

Experimentalgruppe „Simulation mit instruktionaler Hilfestellung 2“		Nachtest			Gesamt
		Klasse 1 (Nicht-Köner)	Klasse 2 (Fakten)	Klasse 3 (Köner)	
Vortest	Klasse 1 (Nicht-Köner)	8	9	6	23
	Klasse 2 (Fakten)	–	1	2	3
	Klasse 3 (Köner)	1	–	–	1
	Gesamt	9	10	8	27

7.2.4 Zuordnungswahrscheinlichkeiten der „Lerner“

Tabelle IX-21: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T1 (Vortest) für die drei Gruppen von „Lernern“

		Vortest		
Klassenwechsel Vortest/Nachtest	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner/Fakten (Lerner)	33	94,4%	5,6%	0,0%
Nicht-Köner/Köner (Lerner)	37	93,9%	6,0%	0,1%
Fakten/Köner (Lerner)	13	7,0%	87,1%	5,9%

Tabelle IX-22: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei latenten Klassen zum Messzeitpunkt T2 (Nachtest) für die drei Gruppen von „Lernern“

		Nachtest		
Klassenwechsel Vortest/Nachtest	N	Nicht-Köner	Fakten	Köner
Nicht-Köner/Fakten (Lerner)	33	10,9%	82,5%	6,6%
Nicht-Köner/Köner (Lerner)	37	2,9%	14,9%	82,2%
Fakten/Köner (Lerner)	13	0,7%	6,3%	93,0%

8 ANMERKUNGEN

¹ Unter *Kontiguitätsprinzip* versteht man die *gleichzeitige* Präsentation von einem Bild oder einer Animation mit dem dazugehörigen erläuternden Text

² In der Studie 2 (Atmungskette) wurde eine instruktional unterstützte Simulationsversion eingesetzt, bei der Studie 3 (Fotosynthese) waren es zwei, die sich hinsichtlich der Qualität und der Quantität der instruktionalen Maßnahmen unterschieden (s. VI 3.1 und VII 3.1).

³ Studie 1 (Biomembranen), Studie 2 (Atmungskette) und Studie 3 (Fotosynthese) wurden alle nach demselben Analyseschema ausgewertet. Da der Faktor 2 (Gestaltungweise der Lernumgebung) erst ab Studie 2 (Atmungskette) eingeführt wurde, wurde bei den Mittelwertsvergleichen in Studie 1 nur der Faktor 1 zugrunde gelegt. Die genannten zweifaktoriellen Varianzanalysen gehen in dem Fall in t-Tests über. Weitere Abweichungen zwischen den Studien 2 und 3 sind gekennzeichnet.

⁴ Als Itemschwierigkeit wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit der ein Angehöriger einer Klasse das entsprechende Item richtig löst.

⁵ Bei Itemhomogenität messen alle Items dieselbe Personenvariable.

⁶ Gemeint sind hier die natürlichen Logarithmen, also *ln L*.

⁷ Die Gleichung (Z1) kann aus dem *Satz von Bayes* hergeleitet werden.

⁸ Personen der Zelle G3 gehören entweder zu den Stagnierenden oder zu den Verlernern. Sie haben keinen Lernzuwachs und sind damit als weitere Vorwissensgruppe nicht von Interesse.

⁹ Beispielitem mit der richtigen Beantwortung:

Kennzeichnen Sie aktive Transportsysteme.

1) *Diffusion*

2) *Transport durch Carrier entlang eines Konzentrationsgradienten*

3) *Transport mittels eines Transportproteins unter ATP-Verbrauch* ✓

4) *Transport zweier Stoffe über eine Biomembran. Der eine wird gegen seinen Konzentrationsgradienten, der andere in Richtung seines Konzentrationsgradienten transportiert.* ✓

Das Bewertungssystem war derart gestaltet, dass für jedes richtig gesetzte Kreuz ein Punkt gegeben wurde. Im obigen Beispiel sind die Antworten 1 & 2 falsch und die Antworten 3 & 4 richtig. Für das Nicht-Ankreuzen der Antworten 1 und 2 und das Ankreuzen der Antworten 3 und 4 wurde jeweils 1 Punkt erteilt; damit konnten maximal 4 Punkte bei Items mit diesem Antwortformat erworben werden.

¹⁰ Unter oxidativer Decarboxylierung versteht man die Abspaltung von Kohlenstoffdioxid von einem Substrat, die mit einem Elektronentransfer einhergeht. Das Substrat gibt bei der Decarboxylierung Elektronen ab; es wird oxidiert. Elektronenakzeptor ist in diesem Fall NAD^+ , das unter zusätzlicher Aufnahme von Protonen zu $\text{NADH}+\text{H}^+$ reduziert wird.

¹¹ Unter „Knallgasreaktion“ versteht man die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff. Sie verursacht bei einem Mischungsverhältnis von 1:1 nach Zündung mittelschwere bis schwere Detonationen (je nach Gesamtvolumen des Gasgemisches).

¹² Die Versuchspersonen erhielten zu ihren eingegebenen Antworten kein sofortiges Feedback. Stattdessen wurden die Antworten auf einer Diskette gespeichert und im Anschluss an die Lernsitzung ausgewertet.

¹³ Die Datensätze aus Vor- und Nachtest wurden vor der Modellierung zusammengefügt. Die angegebene relative Häufigkeit bezieht sich damit auf die doppelte Stichprobengröße ($N=2*131=262$ Vpn).

¹⁴ Die Datensätze aus Vor- und Nachtest wurden vor der Modellierung zusammengefügt. Die angegebene relative Häufigkeit bezieht sich damit auf die doppelte Stichprobengröße ($N=2*131=262$ Vpn).

¹⁵ Die Kopplung von Elektronen- und Protonentransport durch den Q-Zyklus am Cytochrom- b_6/f -Komplex in der Thylakoidmembran erfolgt analog zu dem am Komplex III in der Atmungskette.

¹⁶ Die Datensätze wurden aus Vor- und Nachtest vor der Modellierung zusammengefügt. Die angegebene relative Häufigkeit bezieht sich damit auf die doppelte Stichprobengröße ($N=2*150=300$ Vpn).

¹⁷ Die Datensätze wurden aus Vor- und Nachtest vor der Modellierung zusammengefügt. Die angegebene relative Häufigkeit bezieht sich damit auf die doppelte Stichprobengröße ($N=2*150=300$ Vpn).

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation abgesehen von der Beratung durch meinen Betreuer, Prof. Dr. Horst Bayrhuber, nach Inhalt und Form mein eigenes Werk ist. Bei ihrer Anfertigung habe ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Ferner erkläre ich, dass ich zuvor noch keinen Promotionsversuch unternommen habe und dass insbesondere diese Arbeit weder vollständig noch in Teilen an anderer Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt, veröffentlicht oder zur Veröffentlichung eingereicht worden ist.

Kiel, 20. Dezember 2002

CLAUDIA NERDEL

DIPLOM BIOLOGIN

PERSÖNLICHE DATEN

- Geburtsdatum: 01.10.1971
- Geburtsort: Bremerhaven
- Staatsangehörigkeit: deutsch

DERZEITIGE TÄTIGKEIT

Seit Juli 2000 Wissenschaftliche Mitarbeiterin der AG „NeuroMedia“ in der Abteilung Biologiedidaktik am Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) in Kiel

Anfertigung einer Dissertation im Rahmen des DFG-Projekts „Die Wirkung computergestützter interaktiver Animationen auf das Verständnis von Konzepten komplexer biologischer Prozesse“

STUDIENABSCHLÜSSE AN DER UNIVERSITÄT KIEL

Februar 2000 Erstes Staatsexamen in Biologie und Chemie (Note 2,5)

Juli 1999 Diplom in Biologie (Note 1,0)

STUDIUM AN DER UNIVERSITÄT KIEL

Juli 98 – Juli 99 Diplomarbeit
„Untersuchungen zum Proteintransport in Chloroplasten“

Sept. 95 – Juni 98 Studium der Biologie (Diplom)

Nov. 91 – Juli 95 Studium der Chemie (Höheres Lehramt)

Nov. 91 - Jan. 94 Studium der Mathematik (Höheres Lehramt)

SCHULBILDUNG

Mai 1991 Abitur (Note 2,0)

Sept. 78 – Mai 91 Grundschule, Orientierungsstufe und Gymnasium Langen (Niedersachsen) sowie Oberstufe am Gymnasium Wesermünde in Bremerhaven

Kiel, 20.12.2002