

**Die Wirkung systemischer Darstellungsformen und  
multiperspektivischer Wissensrepräsentationen auf  
das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs**

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

vorgelegt von  
Kristin Hildebrandt

Kiel 2006

Referent/in: Prof. Dr. Horst Bayrhuber

Korreferent/in: Prof. Dr. Claudia Nerdel

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Februar 2007

Zum Druck genehmigt: 7. Februar 2007

Gez. J. Grottemeyer (Dekan)

## **Danksagung**

An dieser Stelle bedanke ich mich ganz besonders bei Herrn Prof. Dr. Horst Bayrhuber für die ausgesprochen gute Betreuung meiner Promotion. Die Diskussionen mit ihm und seine vielfältigen Anregungen waren nicht nur für die vorliegende Arbeit von hohem Wert.

Mein besonderer Dank gilt auch Frau Prof. Dr. Claudia Nerdel für ihre freundschaftliche Hilfsbereitschaft und ihre zahlreichen fachwissenschaftlichen Anmerkungen.

Desweiteren bedanke ich mich ganz herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BMBF-Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ für die gute und langjährige Zusammenarbeit.

Ebenso gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Leibniz-Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, die mich bei meiner Promotion begleitet und unterstützt haben.

Eine Untersuchung zum Lernen kann natürlich nicht ohne Lernende stattfinden. Ich bedanke mich bei allen Lehrkräften, Schülerinnen und Schülern, die freiwillig und gewissenhaft an der Studie mitgewirkt haben.

Außerdem gilt lieber Dank meinen Eltern, meinem Bruder Karsten, meinem Freund Carsten und allen meinen Freunden für ihre Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit.

## Zusammenfassung

Biologieunterricht befasst sich mit verschiedenen Systemen wie zum Beispiel Zellen, Organismen und Ökosystemen. Insbesondere der Umgang mit Komplexität und Dynamik biologischer Systeme bereitet Schülerinnen und Schüler jedoch Schwierigkeiten. Bei der Vermittlung entsprechender Inhalte ist die Förderung der biologischen Kompetenzen *systemisches Denken* und *multiperspektivisches Lernen* notwendig. Zudem muss im Rahmen einer Bildung für Nachhaltigkeit Systemkompetenz erworben werden. Diese Fähigkeiten werden als Voraussetzung dafür angesehen, zu einem verbesserten Verständnis komplexer biologischer Inhalte zu gelangen und auf dieser Grundlage Konzepte zur umweltverträglichen Nutzung der Erde zu entwickeln. Sie zählen deshalb zu den Schlüsselqualifikationen nachhaltiger Entwicklung.

In dieser Studie soll der Umgang mit Komplexität und Dynamik im Fach Biologie am Beispiel eines biogeochemischen Stoffkreislaufs untersucht werden. Diese Kreisläufe schließen biologische, chemische und physikalische Prozesse ein und dienen als Modell zur Illustration der Interaktionen zwischen den Teilsystemen des Systems Erde wie zum Beispiel der Bio-, Atmo-, Hydro- und Lithosphäre. Sie zeichnen sich vor allem durch Komplexität in Struktur und Prozessdynamik aus. Das Konzept der biogeochemischen Stoffkreisläufe basiert auf systemtheoretisch orientierten und interdisziplinären Denk- und Arbeitsweisen, wodurch es der Vermittlung zentraler biologischer Kompetenzen auf der Basis aktueller Bildungsstandards dient. Die Studie verfolgt das Ziel, am Beispiel des globalen Kohlenstoffkreislaufs Förderungsmöglichkeiten für das Erlernen komplexer Konzepte und ihrer flexiblen Anwendung in verschiedenen Kontexten aufzuzeigen.

Die Entwicklung systemischen Denkens kann sich unter anderem im Erlernen systemischer Darstellungsformen vollziehen. Diese graphischen Repräsentationen können dazu dienen, einen Lernstoff zu strukturieren und ein tieferes Verständnis zu ermöglichen. Insbesondere Fluss- und Wirkungsdiagramme spielen beim Erlernen komplexer biogeochemischer Inhalte eine bedeutende Rolle. Dabei wird der aktiven Diagrammkonstruktion ein positiverer lernprozessfördernder Effekt als der passiven Diagrammrezeption zugeschrieben.

Multiperspektivisches Lernen kann ebenfalls den Wissenserwerb in komplexen biogeochemischen Kontexten fördern. Die Einnahme multipler Perspektiven soll dazu dienen multiple Wissensrepräsentationen zu schaffen. Ziel der Induktion ist die flexible Anwendung des Wissens. Die Überlegungen basieren auf der *Cognitive-Flexibility*-Theorie. Bezüglich des fachlichen Inhalts wird multi-perspektivisch gestalteten Texten ein positiverer lernprozessfördernder Effekt als uni-perspektivischen zugeschrieben.

Die Studie geht der Frage nach, welche Wirkung unterschiedliche Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen auf das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben. Es werden die selbständige Konstruktion und die passive Rezeption von Fluss- und Wirkungsdiagrammen sowie der Lernen ohne diese Systemdiagramme verglichen. Zudem wird untersucht, inwieweit der induzierte Wechsel verschiedener inhaltlicher Perspektiven den Lernprozess positiv beeinflusst. Es werden bezüglich des fachlichen Inhalts einperspektivisch und zwei-perspektivisch gestaltete Texte gegenübergestellt. Bei der Analyse der Lernwirksamkeit unterschiedlicher Lernumgebungen werden das themenspezifische Vorwissen, die visuelle bzw. verbale Lernpräferenz und die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung berücksichtigt.

Auf der Grundlage der Systemtheorie und der *Cognitive-Flexibility*-Theorie ist computer-gestütztes Lernmaterial zum globalen Kohlenstoffkreislauf in Kombination mit einem Trainingsprogramm entwickelt worden. Inhalt dieses Trainings ist die Systemanalyse anhand von Lernaufgaben, in denen die selbständige Konstruktion bzw. die passive Rezeption von systemischen Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagrammen) angeleitet und die Möglichkeit zum Wechsel zwischen zwei inhaltlichen Perspektiven geschaffen wird. An der Studie haben 133 Schülerinnen und Schüler des 11. bis 13. Jahrgangs teilgenommen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Lernende mit hohem Vorwissen von der eigenständigen Stofffluss- und Wirkungsdiagrammkonstruktion profitieren. Bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen weist der Einsatz fertiger systemischer Darstellungen einen positiveren lernprozessfördernden Effekt auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die aktive Konstruktion für diese Lernenden keine Erhöhung der wahrgenommenen kognitiven Belastung bedeutet.

Bezüglich der Lernpräferenz zeigte sich, dass Visualisierer erwartungsgemäß beim Lernen des globalen Kohlenstoffkreislaufs stärker vom Einsatz der Stofffluss- und Wirkungsdiagramme profitieren als Verbalisierer. Verbalisierer lernen ohne Systemdiagramme ebenso gut wie mit solchen Diagrammen.

Der lernprozessfördernde Effekt zwei-perspektivischen Wissens konnte in dieser Studie jedoch nicht nachgewiesen werden.

## Abstract

Biology education deals with different systems as for example cells, organisms and ecosystems. Students have problems especially in studying the complexity and the dynamic of biology systems. The improvement of biological competences as *system thinking* and *multi-perspective learning* are necessary for imparting such contents. Furthermore competence in the context of sustainability system must be acquired. These abilities are considered as a prerequisite for a better understanding of complex biological contents. Based on these concepts for the ecologically compatible use of the earth can be developed. Therefore system thinking and multi-perspective learning are counted among key qualifications of sustainable development.

In this study the deal with complexity and dynamic in the school subject biology should be analysed by learning a biogeochemical cycle of matter. These cycles connect biological, chemical and physical processes and serve as a model for the illustration of interactions among the earth's spheres such as biosphere, atmosphere, hydrosphere and lithosphere. They are characterised by complex structures and dynamics of processes. The concept of biogeochemical cycles based on system theory-oriented and interdisciplinary way of thinking and operation. Thereby it serves the learning of central biological competences on the basis of current education standards. The aim of the study is to provide practical guidance for teaching complex concepts of the biogeochemical carbon cycle and their flexible application in different contexts.

System thinking can be developed by learning systemic graphic illustrations. These graphic representations can serve as mental tools for structuring system-oriented contents, and can thus foster conceptual understanding in science as well as other contents. Especially stock-and-flow diagrams play an important role in the case of learning complex biogeochemical contents. In relation to this we may assume that active graphic construction of diagrams is more favourable compared to mere passive perception of diagrams.

Multi-perspective learning can also support the knowledge acquisition in complex biogeochemical contexts. Take up different perspectives should serve for developing multiple knowledge representations. The aim of the introduction is to enhance the flexible use of knowledge in different contexts. The considerations based on the cognitive flexibility theory. With regard to the scientific content we may assume that multi-perspective designed texts are more favourable compared to mere single-perspective created texts.

The following study pursues the question, which effects have different types of using systemic graphic illustrations on the understanding of the global carbon cycle. Active con-

struction and passive reception of stock-and-flow diagrams and causal loop diagrams as well as learning without systemic diagrams are compared. In addition to that it will be analysed, to which extent the induced change of different content perspectives have a positive effect on the learning process. With regard to the scientific content single-perspective designed texts are compared to double-perspective created texts. Analysing the learning properties of the different learning environments the prior knowledge, learning preference (visual/verbal) and the subjective perceived cognitive load are considered.

Computer-assisted learning materials on the global carbon cycle were developed in connection with instructional practices based on system theory and cognitive flexibility theory. System analysis is an aspect of these activities. The learners will be instructed in active graphic construction respectively passive perception of systemic diagrams (stock-and-flow diagrams as well as causal loop diagrams) and in changing between two content perspectives of the biogeochemical topic. In the learning experiment secondary school students (n = 133) from 11th to 13th grade took part.

It turned out that self-construction of causal loop diagrams and stock-and-flow diagrams improves the understanding of biogeochemical contents for students with high prior knowledge. For students with low prior knowledge, passive reception of systemic illustrations is more favourable compared to active construction. In this connection the self-construction activities do not lead to an increase of the individual cognitive load.

Related to learning preferences, those students with visual learning preferences profit to a higher degree from systemic diagrams than students with verbal learning preferences. The learning results of students with verbal learning preferences who learn with systemic diagrams are comparable with the learning results of the students who learn without systemic illustrations.

A positive learning effect of multi-perspective learning by changing between two content perspectives could not be found.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	iv
Abstract .....	vi
Inhaltsverzeichnis .....	viii
Einleitung .....	15

## Teil I Theoretische Grundlagen..... 18

<b>1 Fachwissenschaftliche Grundlagen des globalen Kohlenstoffkreislaufs .....</b>	<b>19</b>
1.1 Biogeochemische Stoffkreisläufe .....	19
1.2 Der globale Kohlenstoffkreislauf .....	21
1.2.1 Kohlenstoffspeicher .....	22
1.2.2 Kohlenstoffflüsse .....	24
1.2.3 Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf .....	26
1.2.4 Der langfristige Kohlenstoffkreislauf .....	27
1.2.5 Der Kohlenstoffkreislauf im Ozean .....	31
1.2.6 Der terrestrische Kohlenstoffkreislauf .....	38
1.2.7 Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf .....	38
<b>2 Systemtheorie .....</b>	<b>42</b>
2.1 Systemdefinition .....	42
2.2 Systemkategorien .....	45
2.3 Systemeigenschaften .....	46
2.4 Systemhierarchie .....	47
2.5 Systemanalyse .....	48
2.6 Modellbildung .....	48
2.7 Systemische Darstellungsformen .....	49
2.7.1 Verbale Beschreibungen .....	51
2.7.2 Wirkungsdiagramme .....	52
2.7.3 Flussdiagramme .....	53
2.7.4 Gleichungssysteme .....	53
<b>3 Systemisches Denken .....</b>	<b>54</b>
3.1 Ansätze zum Systemischen Denken .....	55
3.1.1 Qualitative Ansätze .....	55



3.1.2	Komplexes Problemlösen.....	61
3.1.3	Systemdynamische Ansätze.....	62
3.1.4	Systemisches Denken nach Ossimitz.....	65
3.2	Empirische Untersuchungen zum systemischen Denken in der Didaktik.....	67
3.2.1	Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I.....	68
3.2.2	Entwicklung vernetzten Denkens.....	69
3.2.3	Förderung des systemischen Denkens durch computerunterstützten Biologieunterricht.....	71
3.2.4	Die Bedeutung graphischer Repräsentationen für den Umgang mit einem komplexen dynamischen Problem.....	72
<b>4</b>	<b>Systemkompetenz.....</b>	<b>73</b>
4.1	Kompetenzen.....	73
4.2	<i>Denken in Systemen</i> – eine biologische Kompetenz.....	74
4.3	Systemkompetenz.....	74
<b>5</b>	<b><i>Cognitive-Flexibility-Theorie</i>.....</b>	<b>76</b>
5.1	<i>Cognitive-Flexibility-Theorie</i> – ein instruktionaler Ansatz für die Gestaltung konstruktivistischer Lernumgebungen.....	76
5.2	Untersuchungen zur Wirkung multiperspektivischen Lernens.....	78
5.3	Struktur des Lernmaterials.....	79
<b>6</b>	<b>Einfluss von Lernermerkmalen.....</b>	<b>82</b>
6.1	Einfluss des Vorwissens.....	82
6.2	Einfluss der Lernpräferenz.....	83
<b>7</b>	<b><i>Cognitive-Load-Theorie</i>.....</b>	<b>84</b>
	<b>Teil II Forschungsansatz.....</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Forschungsfragen.....</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Forschungshypothesen.....</b>	<b>89</b>
9.1	Einfluss systemischer Darstellungsformen.....	89
9.2	Einfluss mehrperspektivischen Wissens.....	89
9.3	Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens.....	90
9.4	Einfluss des Vorwissens.....	91
9.5	Einfluss der Lernpräferenz.....	92

9.6 Kognitive Belastung .....	93
<b>Teil III Empirischer Teil .....</b>	<b>94</b>
<b>10 Methoden .....</b>	<b>95</b>
10.1 Versuchspersonen.....	95
10.2 Experimentelles Design.....	95
10.2.1 Variablen .....	96
10.2.2 Konzeption der Studie.....	98
10.2.3 Lerngruppen .....	99
10.2.4 Zeitlicher Ablauf der Studie.....	101
10.3 Material .....	102
10.3.1 Lernumgebung .....	102
10.3.2 Erhebungsinstrumente.....	102
10.4 Statistische Auswertungsmethoden .....	116
10.4.1 Deskriptive Statistik.....	117
10.4.2 t-Test und Varianzanalysen.....	117
10.4.3 Latente Klassenanalyse .....	118
<b>11 Gestaltung der Lernumgebung.....</b>	<b>119</b>
11.1 Fachinhaltliche Darstellung der Lernumgebung .....	119
11.1.1 Fachinhalte der Lernaufgaben.....	121
11.2 Struktur der Lernumgebung .....	124
11.3 Design der Lernumgebung .....	126
11.3.1 Startseite .....	126
11.3.2 Informationsseiten.....	127
11.3.3 Aufgabenseiten.....	132
11.3.4 Beendigung der Arbeit mit der Lernsoftware .....	136
11.4 Differenzierung der Lernumgebung.....	138
11.4.1 Fachinhaltliche Differenzierung.....	138
11.4.2 Strukturelle und designspezifische Differenzierung .....	140
<b>12 Ergebnisse.....</b>	<b>148</b>
12.1 Allgemeine deskriptive Statistiken.....	148
12.1.1 Personaldaten .....	148
12.1.2 <i>Vorwissen</i> .....	153
12.1.3 <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> .....	160
12.1.4 <i>Lernzuwachs/System Erde</i> .....	166

12.2	Einfluss systemischer Darstellungsformen .....	168
12.2.1	Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> ..	168
12.2.2	Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> differenziert nach Faktenwissen und Verständnis.....	171
12.2.3	Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie <i>System Erde</i>	174
12.2.4	Zusammenfassung.....	176
12.3	Einfluss mehrperspektivischen Wissens .....	177
12.3.1	Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	177
12.3.2	Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> differenziert nach Faktenwissen und Verständnis .....	179
12.3.3	Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie <i>System Erde</i> .....	181
12.3.4	Zusammenfassung.....	183
12.4	Kombinierter Einfluss systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens.....	183
12.4.1	Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	184
12.4.2	Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> differenziert nach Faktenwissen und Verständnis.....	186
12.4.3	Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie <i>System Erde</i> .....	190
12.4.4	Zusammenfassung.....	192
12.5	Einfluss des Vorwissens .....	193
12.5.1	Clusteranalyse zur Einteilung der Versuchspersonen in Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensgrad.....	194
12.5.2	Hypothese 4a: Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs .....	196
12.5.3	Hypothese 4b und 4c: Einfluss des Vorwissens bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen .....	197
12.5.4	Hypothese 4d und 4e: Einfluss des Vorwissens bezüglich mehrperspektivischen Wissens .....	208
12.5.5	Hypothesen 4f und 4g: Einfluss des Vorwissens bezüglich der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens .....	217
12.5.6	Zusammenfassung.....	229
12.6	Einfluss der Lernpräferenz .....	230
12.6.1	Clusteranalyse zur Einteilung der Versuchspersonen in Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensgrad.....	230
12.6.2	Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	232

12.6.3	Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> differenziert nach Faktenwissen und Verständnis.....	236
12.6.4	Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie <i>System Erde</i> .....	241
12.6.5	Zusammenfassung.....	245
12.7	Kognitive Belastung.....	245
12.7.1	Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und systemischer Darstellungsformen.....	246
12.7.2	Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und mehrperspektivischen Wissens.....	251
12.7.3	Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens.....	253
12.7.4	Zusammenfassung.....	258
12.8	Latente Klassenanalyse (LCA).....	259
12.8.1	LCA für die Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	259
12.8.2	LCA für die Kategorie <i>System Erde</i> .....	265
12.9	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	270
<b>13</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>274</b>
13.1	Einfluss systemischer Darstellungsformen.....	275
13.2	Einfluss mehrperspektivischen Wissens.....	277
13.3	Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens.....	278
13.4	Vorwissen.....	280
13.5	Lernpräferenz.....	282
13.6	Kognitive Belastung.....	283
<b>14</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>285</b>
<b>Teil IV Anhang.....</b>		<b>287</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Lernsoftware.....</b>	<b>288</b>
A.1	Inhaltsübersicht der Lernsoftware.....	288
A.2	Aufgaben innerhalb der Lernsitzen.....	292
A.2.1	Aufgaben innerhalb der ersten Lernsitzen.....	292
A.2.1.1.	Lernumgebungen <i>A 1</i> und <i>A 2</i> .....	292
A.2.1.2.	Lernumgebungen <i>B 1</i> und <i>B 2</i> .....	295

A.2.1.3.	Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> .....	298
A.2.2	Aufgaben innerhalb der zweiten Lernsitzung .....	300
A.2.2.1.	Lernumgebungen <i>A 1</i> und <i>A 2</i> .....	300
A.2.2.2.	Lernumgebungen <i>B 1</i> und <i>B 2</i> .....	303
A.2.2.3.	Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> .....	307
A.2.3	Aufgaben innerhalb der dritten Lernsitzung .....	310
A.2.3.1.	Lernumgebungen <i>A 1</i> und <i>A 2</i> .....	310
A.2.3.2.	Lernumgebungen <i>B 1</i> und <i>B 2</i> .....	313
A.2.3.3.	Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> .....	317
A.3	Begleitbögen.....	321
<b>Anhang B</b>	<b>Fragebögen.....</b>	<b>323</b>
B.1	Vortestfragebogen .....	323
B.2	Nachtestfragebogen .....	332
<b>Anhang C</b>	<b>Testinstrumente.....</b>	<b>340</b>
C.1	Vorwissenstest.....	340
C.2	Tests zur Erhebung des Lernzuwachses .....	344
C.2.1	Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	344
C.2.2	Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> ..	349
C.3	Tests zur Erhebung kognitiver und motivationaler Kontrollvariablen.....	352
C.3.1	Test zur Erhebung des Computerwissens und Computerinteresses.....	352
C.3.2	Test zur Erhebung der Lernpräferenz .....	353
C.3.3	Test zur Erhebung der graphischen Kompetenz .....	354
C.3.4	Test zur Erhebung der kognitiven Belastung.....	355
C.3.5	Test zur Erhebung der Aufmerksamkeit .....	356
C.3.6	Test zur Erhebung des Interesses .....	357
C.3.7	Test zur Erhebung der Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen .....	358
C.4	Evaluation der Lernumgebung .....	359
<b>Anhang D</b>	<b>Weitere Ergebnisse.....</b>	<b>361</b>
D.1	Weitere Ergebnisse der LCA für die Kategorie <i>Lernerfolg</i> .....	361
D.1.1	3-Klassen-LCA-Modell.....	361
D.1.1.1.	Einfluss des Vorwissens.....	361
D.1.1.2.	Einfluss des Vorwissens und systemischer Darstellungsformen .....	363
D.1.1.3.	Zusammenfassung.....	367

D.1.2	2-Klassen-LCA-Modell.....	368
D.1.2.1.	Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 2-Klassen-LCA- Modells.....	368
D.1.2.2.	Itemprofile des 2-Klassen-LCA-Modells.....	369
D.1.2.3.	Analyse des Lernzuwachses in der Kategorie Lernerfolg...	370
D.1.2.4.	Zusammenfassung.....	377
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>378</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>		<b>388</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>		<b>394</b>

## Einleitung

Biologieunterricht erfährt derzeit eine grundlegende Umorientierung. Dies ist insbesondere auf die Ergebnisse von TIMSS<sup>1</sup> und PISA<sup>2</sup> zurückzuführen. Eine zentrale Rolle innerhalb der Qualitätsentwicklung und Qualitätssicherung im Bildungsbereich wird der Entwicklung von fachspezifischen Bildungsstandards zugeschrieben. Diese formulieren verbindliche Anforderungen an schulische Lehr- und Lernprozesse. Sie legen fest, welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler bis zu einer bestimmten Jahrgangsstufe erwerben sollen. Dabei wird der Unterricht nicht wie bislang durch inputorientierte Steuerung, wie etwa Lehrpläne, bestimmt. Er orientiert sich vor allem an den Lernergebnissen der Schülerinnen und Schüler (Klieme, Bulmahn, Wolff et al., 2003).

Biologieunterricht befasst sich mit verschiedenen Systemen wie zum Beispiel Zellen, Organismen, Ökosystemen und der Biosphäre. Insbesondere der Umgang mit Komplexität und Dynamik biologischer Systeme bereitet Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten. Strukturen und Prozesse sind durch zeitliche und räumliche Entwicklungen bestimmt. Daher ist es notwendig, Beziehungen zwischen den Elementen des Systems zu analysieren. Um Komplexität und Dynamik biologischer Systeme besser verstehen zu können, müssen die biologischen Kompetenzen *systemisches Denken* und *multiperspektivisches Lernen* gefördert werden (KMK, 2004). Im Rahmen einer Bildung für Nachhaltigkeit wird Systemkompetenz als zentrale Kompetenz beschrieben (Rost, Lauströer & Raack, 2003). Sie bildet insbesondere die Basis umweltverträglichen Handelns in individueller und gesellschaftlicher Verantwortung. Die Bildungsstandards im Fach Biologie sind dementsprechend einer Zielsetzung verpflichtet, wie sie in der Definition von *scientific literacy* (OECD) zum Ausdruck kommt: „Naturwissenschaftliche Grundbildung ist die Fähigkeit, naturwissenschaftliches Wissen anzuwenden, naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen und aus Belegen Schlussfolgerungen zu ziehen, um Entscheidungen zu verstehen und zu treffen, welche die natürliche Welt und die durch menschliches Handeln an ihr vorgenommenen Veränderungen betreffen.“ (Prenzel, Rost, Senkbeil, Häußler & Klopp, 2001)

Der Umgang mit Komplexität und Dynamik im Fach Biologie soll in dieser Studie am Beispiel biogeochemischer Stoffkreisläufe untersucht werden. Biogeochemische Stoffkreisläufe umfassen die Gesamtheit aller biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse, durch die spezifische Elemente und ihre chemischen Verbindungen im *System Erde* umgesetzt werden. Sie bilden eine Vernetzung von Leben mit der Atmosphäre, der Hydrosphäre

---

<sup>1</sup> The Third International Mathematics and Science Study (siehe Baumert, Lehmann, Lehrke et al., 1997 und Baumert, Bos & Lehmann, 2000a, b).

<sup>2</sup> Programme for International Student Assessment (siehe OECD, 2003, Baumert, Klieme, Neubrand et al., 2001 und Baumert, Artelt, Klieme et al., 2002).

und der Lithosphäre ab und zeichnen sich durch Komplexität in Struktur und Prozessdynamik aus. Ihre Erforschung stellt einen wissenschaftlichen Bereich mit schnell fortschreitendem Erkenntnisgewinn von großer gesellschaftlicher Bedeutung dar. Die rasche Entwicklung neuer Messtechniken und Computertechnologien bildet die Grundlage für die Analyse von Reservoirgrößen und Stoffflüssen. Identifizierung, Quantifizierung und Modellierung globaler biogeochemischer Stoffkreisläufe setzen in Fachinhalten und Methoden systemtheoretische Betrachtung und interdisziplinäres Arbeiten voraus. Die Fähigkeit, systemisch zu denken, wird inzwischen als Voraussetzung dafür angesehen, zu einem verbesserten Verständnis komplexer biologischer Inhalte zu gelangen und auf dieser Grundlage Konzepte zur umweltverträglichen Nutzung der Erde zu entwickeln. Systemisches Denken zählt deshalb zu den Schlüsselqualifikationen nachhaltiger Entwicklung (Bund-Länder-Kommission, 1999). In verstärktem Maße erfordert ein verbessertes Systemverständnis aber auch die Bewertung von Wechselbeziehungen der Komponenten. Ziel ist es, Veränderungen biogeochemischer Stoffkreisläufe infolge natürlicher Vorgänge von anthropogenen Veränderungen zu unterscheiden, um zum Beispiel klimatische Entwicklungen besser beurteilen zu können. Auf dieser Grundlage können Strategien zum Schutz und zur umweltverträglichen Nutzung unseres Planeten entwickelt werden.

Biogeochemische Stoffkreisläufe eignen sich besonders gut für fächerübergreifenden bzw. fächerverbindenden naturwissenschaftlichen Unterricht. Das Konzept der biogeochemischen Stoffkreisläufe basiert auf systemtheoretisch orientierten und interdisziplinären Denk- und Arbeitsweisen, wodurch es der Vermittlung zentraler biologischer Kompetenzen auf der Basis aktueller Bildungsstandards dient (vgl. Mayer, Harms, Hammann, Bayrhuber & Kattmann, 2004). Um ein tieferes Verständnis der modernen Forschung in der Öffentlichkeit im Sinne von *Lebenslangem Lernen* zu fördern, muss die Vermittlung biogeochemischer Inhalte stärker in den Biologieunterricht integriert werden. Ihre Behandlung im Schulunterricht ist eine besondere Herausforderung. Als Thema für diese Studie ist *Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde* ausgewählt worden.

Die Studie ist im Rahmen des BMBF-Projektes *Forschungsdialog System Erde*<sup>3</sup> durchgeführt worden. Sie geht der Frage nach, auf welche Weise die Komplexität und die Dynamik eines biogeochemischen Systems wie des globalen Kohlenstoffkreislaufs dargestellt werden müssen, um einen lernprozessfördernden Effekt bei Schülerinnen und Schülern zu erreichen. Bei der Analyse der Lernwirksamkeit unterschiedlicher Lernumgebungen werden das themenspezifische Vorwissen, die Lernpräferenz und die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung berücksichtigt.

---

<sup>3</sup> Das BMBF-Projektes *Forschungsdialog System Erde* ist am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel unter der Projektleitung von Prof. Dr. Horst Bayrhuber in der Zeit vom 1. Juni 2000 bis zum 31. Mai 2005 durchgeführt worden (siehe Hlawatsch, Lücken, Hansen, Fischer & Bayrhuber, 2005).



Sowohl systemtheoretisch orientierte als auch interdisziplinäre Denk- und Arbeitsweisen bieten Lösungsansätze. Nach Stern, Aprea und Ebner (2003) dienen Diagramme als mentale Werkzeuge, um einen komplexen Lernstoff zu strukturieren und ein tieferes Verständnis zu ermöglichen. Die Entwicklung systemischen Denkens vollzieht sich insbesondere im Erlernen systemischer Darstellungsformen (Ossimitz, 2000a). Dabei wird der aktiven Diagrammkonstruktion von Systemdiagrammen eine größere verständnisfördernde Wirkung als der passiven Rezeption zugeschrieben (Stern, E., Aprea, C. & Ebner, H., 2003; Hagel, J., 1985; Bell, T., 2002). In dieser Studie wird untersucht, welche Wirkung diese unterschiedlichen Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen auf das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben. Zudem wird der Frage nachgegangen, inwieweit der induzierte Wechsel verschiedener inhaltlicher Perspektiven den Lernprozess positiv beeinflusst. Die Überlegungen basieren auf der *Cognitive-Flexibility*-Theorie (siehe Spiro et al., 1987; Spiro et al., 1992), die sich auf das Erlernen komplexer Inhalte bezieht. Eine zentrale Rolle spielt nach dieser Theorie die Einnahme multipler Perspektiven. Ziel der Induktion von multiplen Wissensrepräsentationen ist die flexible Anwendung des Wissens. Es werden bezüglich des fachlichen Inhalts ein-perspektivisch und zwei-perspektivisch gestaltete Texte verglichen.

In Teil I dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der Studie dargestellt. Ab Seite 19 ff. werden die aktuellen fachwissenschaftlichen Grundlagen zum Thema *Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde* aufgeführt (Kapitel 1). In Kapitel 2 ab Seite 42 ff. werden grundlegende Aspekte der Systemtheorie beschrieben. In Kapitel 3 auf Seite 54 ff. werden verschiedene Ansätze zum systemischen Denken vorgestellt. Die Darstellung des Konzepts Systemkompetenz erfolgt in Kapitel 4 auf Seite 73 ff. Die *Cognitive-Flexibility*-Theorie wird in Kapitel 5 beschrieben (siehe Seite 76 ff.). In Kapitel 6 auf Seite 82 ff. werden das Vorwissen und die Lernpräferenz als Einflussfaktoren für das Lernen dargestellt. Anschließend wird in Kapitel 7 auf Seite 84 ff. die *Cognitive-Load*-Theorie beschrieben.

In Teil II dieser Studie wird der Forschungsansatz präsentiert. In Kapitel 8 werden Forschungsfragen genannt (siehe Seite 87 f.). In Kapitel 9 werden die aus den theoretischen Grundlagen abgeleiteten Hypothesen formuliert (siehe Seite 89 ff.).

In Teil III wird die empirische Studie beschrieben. In Kapitel 10 auf Seite 95 ff. werden die verwendeten Methoden dargestellt. In Kapitel 11 auf Seite 119 ff. wird die Lernumgebung präsentiert. Auf der Grundlage von Systemtheorie und *Cognitive-Flexibility*-Theorie ist computergestütztes Lernmaterial zum globalen Kohlenstoffkreislauf entwickelt worden. Dabei sind die Aspekte der Vermittlung von Systemkompetenz berücksichtigt worden. In Kapitel 12 auf Seite 148 ff. werden die Ergebnisse der empirischen Studie vorgestellt, die in Kapitel 13 auf Seite 274 ff. diskutiert werden. Abschließend wird in Kapitel 14 auf Seite 285 f. ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten und den Einsatz systemischer Darstellungsformen im Schulunterricht gegeben.

**Teil I**  
**Theoretische Grundlagen**

# 1 Fachwissenschaftliche Grundlagen des globalen Kohlenstoffkreislaufs

Um die Komplexität und Dynamik des globalen Kohlenstoffkreislaufs besser zu verstehen, wird dieser als System betrachtet, das die Gesamtheit aller biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse umfasst, durch die Kohlenstoff und seine chemischen Verbindungen auf der Erde umgesetzt werden. Das Konzept biogeochemischer Kreisläufe basiert auf systemtheoretisch orientierten und interdisziplinären Denk- und Arbeitsweisen. Es werden grundlegende Aspekte der Systemtheorie (siehe Kapitel 2 auf Seite 42 ff.) und verschiedene naturwissenschaftliche Disziplinen (siehe *Cognitive-Flexibility*-Theorie, Kapitel 5 auf Seite 76 ff.) berücksichtigt.

Kapitel 1.1 wird das Konzept biogeochemischer Stoffkreisläufe beschrieben. Im Anschluss wird der globale Kohlenstoffkreislauf vorgestellt. Es werden die Kohlenstoffspeicher (siehe Kapitel 1.2.1 auf Seite 22 ff.) und die Kohlenstoffflüsse (siehe Kapitel 1.2.2 auf Seite 24 ff.) im System Erde berücksichtigt.

Je nach zeitlicher und räumlicher Schwerpunktsetzung lässt sich der globale Kohlenstoffkreislauf weiter unterteilen. In Kapitel 1.2.3 auf Seite 26 ff. wird der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf und in Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff. der langfristige Kohlenstoffkreislauf beschrieben. Zudem werden der Kohlenstoffkreislauf im Ozean (siehe Kapitel 1.2.5 auf Seite 31 ff.) und der terrestrische Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.6 auf Seite 38 f.) vorgestellt. Abschließend wird der anthropogene Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf angeführt (siehe Kapitel 1.2.7 auf Seite 38 ff.).

## 1.1 Biogeochemische Stoffkreisläufe

Biogeochemische Stoffkreisläufe umfassen die Gesamtheit aller biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse, durch die spezifische Elemente oder ihre chemischen Verbindungen im System Erde umgesetzt werden. Diese Prozesse kennzeichnen die permanenten Stoffflüsse zwischen den Stoffspeichern, d. h. die Wege, die spezifische Elemente oder ihre chemischen Verbindungen zwischen Teilsystemen des Systems Erde nehmen. Biogeochemische Stoffkreisläufe sind Kreisläufe, bei denen chemische Elemente oder ihre Verbindungen zwischen biotischen und abiotischen Teilsystemen des Systems Erde zirkulieren. Sie stellen damit die Kopplung von biologischen Prozessen mit Vorgängen in der

Atmosphäre, der Hydrosphäre und der Lithosphäre<sup>4</sup> dar (siehe Butcher, Charlson, Orians & Wolfe, 1992, Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002).

Als Stoffspeicher bezeichnet man die einzelnen Teilsysteme des Systems Erde, in denen spezifische Elemente oder ihre chemischen Verbindungen enthalten sind. Innerhalb dieser Speicher können Stoffe in verschiedenen chemischen Bindungsformen, z. B. als organische oder anorganische Verbindung, und verschiedenen Aggregatzuständen, z. B. in fester, flüssiger oder gasförmiger Form, vorliegen. Stoffflüsse stellen den gerichteten Transport spezifischer Stoffe oder ihrer chemischen Verbindungen von einem Stoffspeicher in einen anderen dar. Sie sind zumeist mit einer Änderung der chemischen Bindungsform oder des Aggregatzustandes verbunden. Flüsse sind absolute Änderungen von Speichergrößen. Das Ausmaß eines Stoffflusses innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, d. h. die Menge, die pro Zeitintervall fließt, wird als Flussrate bezeichnet.

Neben den Wegen, die Stoffe im System Erde zurücklegen, sind die Zeiträume, in denen dieses geschieht, von Bedeutung. Je nachdem, ob Stoffspeicher innerhalb eines bestimmten Zeitraumes ein spezifisches Element oder seine chemischen Verbindungen an einen anderen Speicher abgeben oder aus einem anderen Speicher aufnehmen, können sie sowohl Quellen als auch Senken im jeweiligen Stoffkreislauf darstellen. Zudem ist die Dynamik von Stoffkreisläufen entscheidend von den Verweilzeiten der Stoffe in einem Speicher geprägt. In einigen Speichern verbleiben Stoffe relativ lang, in anderen hingegen relativ kurz. Die Verweilzeiten hängen davon ab, in welchem Maße und wie rasch die Stoffe mit anderen Speichern ausgetauscht werden.

---

<sup>4</sup> Die *Atmosphäre* ist die überwiegend gasförmige äußere Hülle der Erde. Anhand des Temperaturverlaufes kann sie in Abhängigkeit von der Höhe in vier Teilsysteme unterteilt werden: Tropo-, Strato-, Meso- und darüber liegende Thermosphäre. Die heutige Atmosphäre setzt sich zusammen aus Stickstoff (ca. 78,1%), Sauerstoff (ca. 21%) und Argon (ca. 0,9%) und anderen Gasen, die nur in geringen Konzentrationen enthalten sind, wie zum Beispiel Kohlenstoffdioxid (ca. 0,034%) und Wasserstoff (ca. 0,00005%; Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

Die *Biosphäre* ist die Gesamtheit aller Ökosysteme, d.h. die Gesamtheit aller funktionellen Einheiten aus Lebensgemeinschaft (Biozönose) und Lebensraum (Biotop). Zur Biosphäre gehören demnach auch als Lebensraum dienende Bereiche der Atmo-, Hydro- und Lithosphäre. Im engeren Sinne umfasst die Biosphäre alle lebenden Organismen (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

Die *Hydrosphäre* ist die Wasserhülle der Erde. Sie umfasst das die Erdoberfläche bedeckende Wasser, d. h. den Ozean, die Flüsse und die Seen. Die Hydrosphäre durchdringt Litho- (Grundwasser), Pedo- (Bodenwasser) und Atmosphäre (Wasserdampf). Ein Teil der Hydrosphäre ist die Kryosphäre. Sie umfasst das im gefrorenen Zustand auf der Erde vorkommende Wasser (Eisschild, Gletscher, Schneedecken; Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

Die *Lithosphäre* ist die äußere etwa 100 – 200 km mächtige starre Kruste der Erde. Sie umfasst die kontinentale und die ozeanische Erdkruste sowie den oberen Erdmantel (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

Die *Pedosphäre* umfasst die Bereiche der Erde, in denen durch bodenbildende Prozesse Böden entstehen. Sie stellt somit einen räumlichen Durchdringungsbereich von Atmo-, Bio-, Hydro- und Lithosphäre dar (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

Die Änderungen der Größe von Stoffspeichern, Stoffflüssen und Flussraten bestimmen die Entwicklung des biogeochemischen Stoffkreislaufs. Angetrieben werden biogeochemische Stoffkreisläufe von der zeitlich und räumlich variierenden Energiezufuhr durch die Sonne in Form von Strahlung und dem geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren.

## 1.2 Der globale Kohlenstoffkreislauf

Gegenwärtig steigt der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um etwa  $3,3 \pm 0,1$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr an (IPCC, 2001). Für diesen Anstieg sind die Kohlenstoffdioxidemissionen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle, aus der Herstellung von Zement ( $5,4 \pm 0,3$  GtC/Jahr<sup>5</sup>), sowie aus Änderungen der Landnutzung, vor allem der Brandrodung von Wäldern ( $1,7$  GtC/Jahr<sup>6</sup>), verantwortlich (IPCC, 2001). Die angeführten anthropogenen Quellen liefern zusammen etwa  $7,1$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Dies bedeutet, dass etwa  $3,8$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr von weiteren Senken aufgenommen werden müssen. Wo verbleibt der Kohlenstoff? Welche Prozesse bestimmen die Kohlenstoffflüsse aus der Atmosphäre? Der Ozean ist vermutlich die wichtigste Senke für das anthropogene Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre. Er nimmt pro Jahr etwa  $1,9 \pm 0,6$  Gigatonnen Kohlenstoff<sup>7</sup> auf (IPCC, 2001). Zudem fließen durch veränderte Landnutzung, vor allem durch Aufforstung, etwa  $0,2 \pm 0,7$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in die Landbiomasse (IPCC, 2001, Houghton, 1999, 2000, Houghton & Hackler, 1999, McGuire et al., 2001). Bislang ist noch ungeklärt, in welcher Senke („missing sink“) die restlichen  $1,7$  Gigatonnen Kohlenstoff verbleiben.

Von besonderem Interesse ist die Frage nach der klimatischen Bedeutung des Anstiegs der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration. Zahlreiche Wissenschaftler vermuten in ihm den Grund für die Temperaturerhöhung um etwa  $0,7$  Grad Celsius während des letzten Jahrhunderts (Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002). Um diese Zusammenhänge besser verstehen zu können, müssen die Prozesse untersucht werden, die die Kohlenstoffflüsse aus der Atmosphäre in andere Senken bestimmen.

Neben der Klimarelevanz veränderter Kohlenstoffflüsse interessieren auch die Rückkopplungen des Klimasystems auf den globalen Kohlenstoffkreislauf. Änderungen des Klimas, wie z. B. steigende Temperaturen, erhöhte Niederschlagsmengen oder sich häufende starke

---

<sup>5</sup> Vgl. Bolin, Sukumar, Ciais et al. (2000): Kohlenstoffdioxidemissionen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle, sowie aus der Herstellung von Zement erreichen  $6,3 \pm 0,4$  GtC/Jahr.

<sup>6</sup> Vgl. Bolin, Sukumar, Ciais et al. (2000) and Houghton (2000): Kohlenstoffdioxidemissionen aus Änderungen der Landnutzung erreichen  $1,6 \pm 0,8$  GtC/Jahr.

<sup>7</sup> Vgl. Bolin, Sukumar, Ciais et al. (2000), Jain et al. (1995) and Harvey et al. (1997): Kohlenstoffdioxidaufnahme des Ozeans erreicht  $2,3 \pm 0,5$  GtC/Jahr.

Winde, können die Kohlenstoffflüsse zwischen den einzelnen Speichern beeinflussen. Eine Zunahme der Lufttemperatur und damit der Meeresoberflächentemperatur bewirkt eine Verringerung der Löslichkeit von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid in Meerwasser. Dies bedeutet einen Nettofluss von Kohlenstoff aus der Hydrosphäre in die Atmosphäre. Ein Anstieg der Lufttemperaturen in Verbindung mit starken Regenfällen führt zu einer Erhöhung der Verwitterungsrate von Carbonatgesteinen. Damit ist ein Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre und der Lithosphäre in die Hydrosphäre verbunden (Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002).

Verlässliche Vorhersagen zur Entwicklung des Klimas oder anderer Teilsysteme des Systems Erde hängen entscheidend vom Verständnis der Stoffkreisläufe ab. Die Analyse dieser Teilsysteme des Systems Erde ist ein Schritt auf dem Weg zu einem verbesserten Gesamtverständnis unseres Planeten. Von besonderem Interesse ist das Konzept des biogeochemischen Stoffkreislaufs (siehe Kapitel 1.1 auf Seite 19 f.). Es beinhaltet die Betrachtung einzelner Elemente, z. B. Kohlenstoff, und ihrer Flüsse im Gesamtsystem. Letztlich reicht diese elementspezifische Betrachtung nicht aus. Zum biogeochemischen Stoffkreislaufkonzept zählt auch die Kopplung eines Stoffkreislaufsystems mit anderen Systemen, wie zum Beispiel einem weiteren Stoffkreislaufsystem oder dem bereits erwähnten Klimasystem.

### **1.2.1 Kohlenstoffspeicher**

Die Atmosphäre, die Biosphäre, die Hydrosphäre und die Lithosphäre sind die vier bedeutendsten Kohlenstoffspeicher im System Erde. Je nach Speicher existiert Kohlenstoff nicht nur in verschiedenen chemischen Bindungsformen und Aggregatzuständen, sondern auch in sehr unterschiedlichen Mengen. Die Kohlenstoffspeicher stehen in ständiger Wechselbeziehung. Sie tauschen an ihren Grenzflächen permanent Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen miteinander aus. Die Austauschprozesse zwischen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sind in Kapitel 1.2.2 auf Seite 24 ff. dargestellt.

Die Lithosphäre ist der weitaus größte Kohlenstoffspeicher im System Erde. Etwa 99,95 % des Kohlenstoffs auf der Erde ist im Sedimentgestein in Form von Carbonaten und Kero-gen enthalten. Neben diesen anorganischen Verbindungen kommt Kohlenstoff in der Lithosphäre auch in organischer Form als fossile Formation, wie Erdgas, Erdöl und Kohle, und in elementarer Form als Graphit oder Diamant vor. Nach heutigen Schätzungen befinden sich in der Lithosphäre mehr als 75.000.000 Gigatonnen Kohlenstoff (siehe Tab. 1 auf Seite 23).

Speicher	Form	Kohlenstoffmenge [GtC]
<b>Atmosphäre</b>	Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Methan (CH <sub>4</sub> )	720 <sup>1</sup> ; 730 <sup>3</sup> ; 750 <sup>2; 5</sup> ; 790 <sup>4</sup>
<b>Biosphäre</b>	Organischer Kohlenstoff und Calciumcarbonat (CaCO <sub>3</sub> ) in terrestrischen Organismen und in marinen Organismen	460 <sup>4</sup> ; 500 <sup>3</sup> ; 560 <sup>2</sup> ; 610 <sup>5</sup> ; 600 – 1000 <sup>1</sup> 1 – 2 <sup>1</sup> ; 3 <sup>2; 4; 5</sup>
<b>Hydrosphäre</b>	Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ), Hydrogencarbonat (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) und Carbonat (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	37.400 <sup>1</sup> ; 38.000 <sup>3</sup> ; 39.000 <sup>2</sup> ; 39.120 <sup>5</sup> ; 39.150 <sup>4</sup>
<b>Lithosphäre</b>	<u>Sediment</u> : Carbonate (z. B. Calciumcarbonat (CaCO <sub>3</sub> , Calcit), Calcium-Magnesium-Carbonat (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Dolomit)) Kerogen Gashydrate  <u>Fossile Rohstoffe</u> : Kohle, Erdöl und Erdgas	> 60.000.000 <sup>1; 2</sup>  15.000.000 <sup>1; 2</sup> 10.000 <sup>6</sup>  4.130 <sup>1</sup>
<b>Pedosphäre</b>	<u>Boden</u> : Detritus, Humus und Torf	1.200 <sup>1</sup> , 1.460 <sup>4</sup> ; 1.500 <sup>3</sup> ; 1.580 <sup>2; 5</sup>

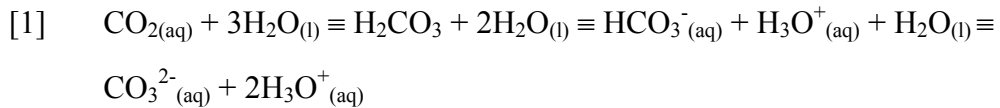
**Tab. 1:** Kohlenstoffvorkommen im System Erde: <sup>1</sup>Falkowski, Scholes, Boyle et al. (2000), <sup>2</sup>Ittekkot, Rixen, Suthof et al. (2002), <sup>3</sup>IPCC (2001), <sup>4</sup>Lochte (2004); <sup>5</sup>Schimel, Enting, Heimann et al. (1995) and <sup>6</sup>Bund-Länder-Kommission (1999).

Nur etwa 0,05 % des Kohlenstoffs sind in den übrigen Teilsystemen des Systems Erde gespeichert. Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre stellen demnach nur sehr kleine Kohlenstoffspeicher dar.

In der Atmosphäre kommt Kohlenstoff hauptsächlich in anorganischen Verbindungen als Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid, sowie in organischer Form als Methan vor. Nach heutigen Schätzungen sind in der Atmosphäre bis zu 790 Gigatonnen Kohlenstoff gespeichert (Lochte, 2004). Sie ist der kleinste Speicher unter den Sphären. Im System Kohlenstoffkreislauf spielt sie jedoch eine bedeutende Rolle. Die Flussraten zwischen der Atmosphäre und anderen Sphären sind relativ groß. Zudem haben schon geringe Zuflussmengen aus anderen Speichern innerhalb der Atmosphäre eine relativ große Konzentrationsänderung zur Folge.

In der Biosphäre kommt Kohlenstoff in organischen Verbindungen, wie zum Beispiel Kohlehydraten, Proteinen, Fetten und Nukleinsäuren vor und stellt damit das Grundelement aller Organismen dar.

In der Hydrosphäre kommt Kohlenstoff vor allem in anorganischen Verbindungen als physikalisch gelöstes Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ ), Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-_{(\text{aq})}$ ) und Carbonat-Ionen ( $\text{CO}_3^{2-}_{(\text{aq})}$ ) vor. Das chemische Gleichgewicht dieser Verbindungen in Wasser wird durch das Carbonatsystem beschrieben:



Dieses chemische Gleichgewichtssystem ist abhängig von der Temperatur, dem Druck, dem pH-Wert und dem Salzgehalt des Wassers. Ozeanwasser enthält überwiegend Hydrogencarbonat-Ionen. Bei einer Temperatur von 10° C, einem pH-Wert von 8 und einem Salzgehalt von 34,3 ‰ liegen im Ozeanwasser ca. 94 % des gelösten anorganischen Kohlenstoffs als Hydrogencarbonat-Ionen, ca. 5 % als Carbonat-Ionen und nur ca. 1 % als physikalisch gelöstes Kohlenstoffdioxid vor. Nach heutigen Schätzungen befinden sich in der Hydrosphäre etwa 39.000 Gigatonnen Kohlenstoff (siehe Tab. 1 auf Seite 23).

In der Pedosphäre kommt Kohlenstoff in Form von Humus, Torf, Bodensedimenten und mineralischen Stoffen vor. Nach heutigen Schätzungen befinden sich in der Pedosphäre etwa 1500 Gigatonnen Kohlenstoff (siehe Tab. 1 auf Seite 23).

### 1.2.2 Kohlenstoffflüsse

Als Kohlenstoffkreislauf bezeichnet man die Gesamtheit aller Prozesse, durch die Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen im System Erde umgesetzt werden (siehe Abb. 1 auf Seite 25). Diese Prozesse kennzeichnen die permanenten Kohlenstoffflüsse zwischen den Kohlenstoffspeichern. Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre tauschen an ihren Grenzflächen permanent Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen aus. Angetrieben wird das System Kohlenstoffkreislauf von der zeitlich und räumlich variierenden Energiezufuhr durch die Sonne in Form von Strahlung und dem geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren. Das Kreislaufkonzept impliziert, dass es sich beim globalen Kohlenstoffkreislauf nicht um einen einzelnen Kreislauf handelt, in dem die Kohlenstoffflüsse nur in eine Richtung verlaufen. Vielmehr umfasst das System Kohlenstoffkreislauf zahlreiche Teilkreisläufe, in denen die Flüsse des Kohlenstoffs oder seiner Verbindungen in vielfältige Richtungen zwischen den Sphären ablaufen können.

Je nach zeitlicher und räumlicher Schwerpunktsetzung lässt sich das System Kohlenstoffkreislauf weiter unterteilen. Die sehr unterschiedlichen Zeiträume, durch die die Austauschprozesse gekennzeichnet sind, erlauben eine Einteilung der globalen Kohlenstoffflüsse in einen kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.3 auf Seite 26 ff.) und einen langfristigen Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff.). Die spezifi-



schen Eigenschaften mariner und terrestrischer Kohlenstoffspeicher führen zur Einteilung der globalen Kohlenstoffflüsse in einen Kohlenstoffkreislauf im Ozean (siehe Kapitel 1.2.5 auf Seite 31 ff.) und einen terrestrischen Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.6 auf Seite 38 f.).

Die beschriebenen Kreisläufe sind Teilkreisläufe des globalen Kohlenstoffkreislaufs bzw. Teilsysteme des Systems Kohlenstoffkreislauf. Sie sind nicht klar voneinander abgrenzbar. Einige Elemente bzw. Teilsysteme oder Prozesse spielen in mehreren Teilkreisläufen eine Rolle. Organismen bzw. die Prozesse Fotosynthese und Atmung sind sowohl Teil des kurzfristigen als auch des terrestrischen und marinen Kohlenstoffkreislaufes. Der Sedimentationsprozess von Organismen im Meer spielt nicht nur im Kohlenstoffkreislauf im Ozean, sondern auch im langfristigen Kohlenstoffkreislauf eine bedeutende Rolle. Dies macht deutlich, dass bei der Systemanalyse vom Systembetrachter ein Modell konstruiert wird, das eine Auswahl von Elementen und Beziehungen abbildet. Ein Modell stellt eine Struktur- und Prozessanalogie eines Originals dar und ist daher eine idealisierte, abstrahierte, generalisierte oder vereinfachte Darstellung des Systems, die stets einen spezifischen Modellzweck verfolgt.

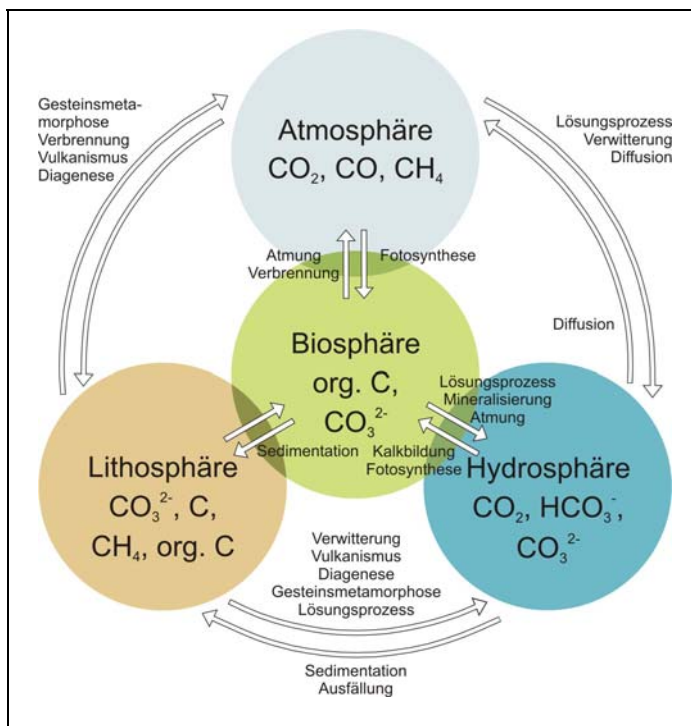
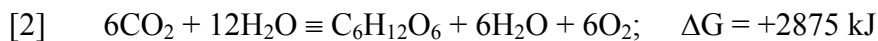


Abb. 1: Sphärenmodell.

### 1.2.3 Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf

Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf umfasst vor allem biochemische Prozesse, die den Fluss von Kohlenstoff oder seinen chemischen Verbindungen im System Erde steuern. Biochemische Prozesse sind Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung biotischer Systeme abläuft. Dazu zählen Fotosynthese und Atmung. Eine zentrale Rolle im kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf spielen die Speicher, in denen der Kohlenstoff nur eine relativ kurze Zeit verbleibt, die von Minuten bis zu Tagen, Jahren oder maximal einigen Tausend Jahren reicht. Zu diesen Speichern gehören vor allem die Luft, die lebenden Organismen und der Ozean. Die Lithosphäre spielt im kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf keine bedeutende Rolle. Entscheidend für den kurzfristigen Kreislauf sind die Wechselbeziehungen zwischen der Atmosphäre, der Biosphäre und der Hydrosphäre. Während die am kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf beteiligten Kohlenstoffspeicher extrem klein sind, sind die Flussraten in Relation dazu sehr hoch, beispielsweise wenn fotosynthetisierende Organismen Kohlenstoffdioxid assimilieren oder wenn Kohlenstoffdioxid zwischen Luft und Wasser hin und her diffundiert, d. h. atmosphärisches Kohlenstoffdioxid sich in Wasser löst bzw. physikalisch gelöstes Kohlenstoffdioxid aus dem Wasser in die Luft entweicht.

Die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Biosphäre werden durch die Prozesse Fotosynthese und Atmung bestimmt. Pflanzen besitzen die Fähigkeit, aus Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre und Wasser Kohlenhydrate aufzubauen und dabei Sauerstoff an die Atmosphäre abzugeben. Bei diesem Prozess dient Sonnenlicht als Energiequelle; man bezeichnet ihn daher als Fotosynthese. Die Bruttoreaktionsgleichung der Fotosynthese lautet:



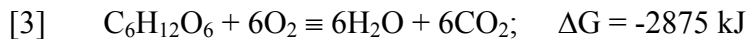
Durch die Fotosynthese terrestrischer Pflanzen werden der Atmosphäre jährlich etwa 120 Gigatonnen Kohlenstoff entzogen (IPCC, 2001, Lochte, 2004)<sup>8</sup>. Marines Phytoplankton nimmt auf Grund fotosynthetischer Aktivität 103 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr aus dem Wasser auf (IPCC, 2001, Lochte, 2004). Dabei ist zu beachten, dass die terrestrischen Organismen einen über 260-fach größeren Kohlenstoffspeicher darstellen als die marinen Organismen.

Die formale Umkehrung der Fotosynthese ist die Atmung. Diese ist der Prozess der Energiegewinnung von Organismen durch den oxidativen Abbau organischer Verbindungen. Man unterscheidet die äußere Atmung (Gaswechsel, Respiration), welche die Aufnahme von Sauerstoff und die Abgabe von Kohlenstoffdioxid beschreibt, von der inneren Atmung (Zellatmung, Dissimilation), unter der man den schrittweisen oxidativen Abbau energiereicher organischer Substanzen in den Zellen (unter anderem in der Atmungskette) versteht.

---

<sup>8</sup> Vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002): 113 GtC/Jahr.

Dieser ist für die Organismen mit einem Energiegewinn verbunden und liefert die Abgabe energiearmer Ausscheidungsprodukte.



Auch die terrestrischen Pflanzen nutzen diese Reaktion, um Energie für ihre Stoffwechselprozesse zu gewinnen und geben so etwa 60 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich in Form von Kohlenstoffdioxid an die Atmosphäre ab (IPCC, 2001, Lochte, 2004). Die verbleibenden 60 Gigatonnen Kohlenstoff werden jährlich in der Vegetation gebunden. Ein Großteil dieser Biomasse fällt als Streu an und wird durch Bodenbakterien mineralisiert (heterotrophe Respiration). 55 Gigatonnen des ursprünglich gespeicherten Kohlenstoffs werden in Form von Kohlenstoffdioxid wieder an die Atmosphäre abgegeben (IPCC, 2001)<sup>9</sup>. Die restlichen fünf Gigatonnen Kohlenstoff gehen pro Jahr in die Nettoproduktion des Systems ein. Durch Waldrodung bzw. Holzverbrennung sowie durch Abfluss gelösten Kohlenstoffs verringert sich dieser Wert. Der Rest wird in den langfristigen Kohlenstoffkreislauf in Form von schwer abbaubarem Humus überführt (Bildung von Kohlelagerstätten).

Zum kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf gehören auch die raschen Austauschprozesse zwischen der Atmosphäre und dem Ozean (Diffusion, Lösungsprozess von Gasen) und der Transportprozess kohlenstoffdioxidhaltiger Wassermassen in große Tiefen des Ozeans („physikalische Kohlenstoffpumpe“). Diese Prozesse werden in Kapitel 1.2.5 auf Seite 31 ff. beschrieben.

#### **1.2.4 Der langfristige Kohlenstoffkreislauf**

Der langfristige Kohlenstoffkreislauf umfasst vor allem geochemische Prozesse, die den Fluss von Kohlenstoff oder seinen chemischen Verbindungen im System Erde steuern. Geochemische Prozesse sind Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung abiotischer Systeme abläuft. Dazu zählen Diagenese, Gesteinsmetamorphose, Sedimentation, Verwitterung und Vulkanismus. Diese Vorgänge spielen sich in erdgeschichtlichen Zeiträumen ab. Zudem verbleibt der Kohlenstoff eine relativ lange Zeit in den Speichern. Die Verweildauer reicht von Tausenden bis zu Millionen oder sogar Milliarden von Jahren. Zu diesen Speichern gehören Teilsysteme der Lithosphäre, z. B. Carbonatgestein und fossile Brennstoffe. Während die am langfristigen Kohlenstoffkreislauf beteiligten Kohlenstoffspeicher extrem groß sind, sind die Flussraten in Relation dazu verschwindend gering. Ein Beispiel ist die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus der vulkanischen Verflüssigung von Carbonatgestein.

---

<sup>9</sup> Vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002): 50 GtC/Jahr; Lochte (2004): 60 GtC/Jahr.

Der langfristige Kohlenstoffkreislauf umfasst zwei Vorgänge, die sich in erdgeschichtlichen Zeiträumen abspielen, die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Lithosphäre und die Einlagerung von organischem Kohlenstoff in die Lithosphäre. Die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Lithosphäre werden durch die Prozesse Diagenese, Gesteinsmetamorphose, Verwitterung und Vulkanismus bestimmt. Diagenese ist die Verfestigung eines losen Sediments. Sie umfasst biologische, chemische und physikalische Umwandlungen von organischen oder mineralischen Stoffen bis zum Eintreten von druck- und temperaturbedingten Veränderungen. Durch biochemischen und chemischen Abbau abgestorbener organischer Materie können bei fortlaufender Sedimentüberlagerung Huminstoffe entstehen, aus denen Kerogen<sup>10</sup> und Bitumen<sup>11</sup> gebildet wird. Dabei entsteht unter anderem Methan. Die Diagenese geht fließend in den Prozess der Gesteinsmetamorphose über. Diese ist der Prozess der Umwandlung von überwiegend festem Gestein aufgrund spezifischer chemischer und physikalischer Bedingungen im Erdinneren. Veränderte Temperatur- und Druckverhältnisse führen zu Änderungen des Gesteins. Bei steigender Hitze und zunehmendem Druck reagieren Carbonatminerale und Silicatminerale an den Kontaktstellen von Carbonatgestein und Silikatgestein. Es entstehen neue Mineralien. Kohlenstoffdioxid wird freigesetzt. Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>, Calcit, Kalkstein) und Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>, Quarz) reagieren zu Calciumsilicat (CaSiO<sub>3</sub>, Wollastonit) und Kohlenstoffdioxid. Calcium-Magnesiumcarbonat (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Dolomit, dolomitischer Kalkstein), Siliziumdioxid und Wasser reagieren zu Talk (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, Speckstein), Calciumcarbonat und Kohlenstoffdioxid.



Das bei der Diagenese und Gesteinsmetamorphose freigesetzte Methan und Kohlenstoffdioxid kann über Klüfte und Poren des Gesteins in die Atmosphäre gelangen.

Auch durch vulkanische Aktivität kann Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden. Vulkanismus umfasst sämtliche Prozesse und Erscheinungsformen, die mit dem Austritt von Magma an die Erdoberfläche im Zusammenhang stehen. Durch die mit dem Magmenaufstieg

---

<sup>10</sup> Kerogen ist der unlösliche Bestandteil der organischen Materie des Sedimentgesteins. Es bildet sich während der Diagenese aus unterschiedlichen organischen Ausgangsmaterialien wie Bakterien, Plankton und Pflanzen. Es ist Ausgangsstoff für die Bildung von Erdöl und Erdgas (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

<sup>11</sup> Bitumen ist der mit niedrigsiedenden Lösungsmitteln, wie etwa Dichlormethan, extrahierbare Anteil des organischen Materials in Sedimentgesteinen. Es besteht aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen und Heterokomponenten, wie etwa Harze und Asphaltene. Das Bitumen entsteht zum großen Teil beim thermischen Abbau des Kerogens in einem Temperaturbereich von 100° C bis 150° C. Es befindet sich zunächst im Porenraum des Gesteins und kann bei entsprechend hohen Bildungsraten teilweise in Form von Erdöl auf dem Wege der primären Migration in benachbarte Gesteine abgegeben werden (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

einhergehende Druck- und Temperaturerniedrigung gehen gelöste flüchtige Bestandteile, wie zum Beispiel Kohlenstoffdioxid, Wasser oder Schwefeldioxid in die Gasphase über. Diese magmatischen Gase bilden im Magma Blasen, die in die Atmosphäre oder auch Hydrosphäre entgasen. Auf diese Weise wird Kohlenstoff, der z. B. in Kalkstein oder Kerogen gebunden war, in Form von Kohlenstoffdioxid freigesetzt.

An den Subduktionszonen<sup>12</sup> ist die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus den Sedimenten eine Kopplung von Gesteinsmetamorphose und Vulkanismus. Sedimente aus Kalkskeletten abgestorbener Meeresorganismen enthalten Kohlenstoff in Form von Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ , Calcit) und Calciummagnesium-Carbonat ( $\text{CaMgCO}_3$ , Dolomit). In Sedimenten wie Tongesteinen oder Ölschiefen findet man Kohlenstoff aus den organischen Anteilen abgestorbener Organismen, als Kerogen. Auf Grund sehr langsamer Konvektionsströme im Erdmantel, die durch den geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren entstehen, werden die Schollen der Erdkruste gegeneinander bewegt. Dadurch wird zum Beispiel an den Kontinentalrändern des westlichen Pazifiks Meeresboden mit Sedimenten unter die Kontinentalplatten gedrückt und erhitzt. Bei hinreichend hoher Temperatur und ausreichendem Druck reagiert dort Calciumcarbonat mit Siliziumdioxid zu Calciumsilicat und Kohlenstoffdioxid (siehe [4]). Das gebildete Kohlenstoffdioxid tritt in der Umgebung von Vulkanen durch das poröse Gestein in die Atmosphäre oder Hydrosphäre aus, z. B. in Mineralquellen,

Durch die beschriebenen Ausgasungsprozesse werden weniger als 0,1 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr aus der Lithosphäre freigesetzt (IPCC, 2001). Obwohl die Lithosphäre mit über 75.000.000 Gigatonnen Kohlenstoff den größten Kohlenstoffspeicher im System Erde darstellt, sind die Abflüsse aus diesem Speicher sehr gering. Sie beeinflussen den Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre lediglich auf Zeitskalen von Millionen von Jahren (Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002).

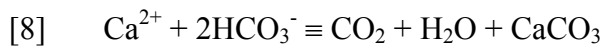
Die Lösungsverwitterung von Carbonat- und Silikatgesteinen ist hingegen mit einem Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre und der Lithosphäre in die Hydrosphäre verbunden. An der Verwitterung ist Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) beteiligt, die durch Lösung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid in Regen- oder Grundwasser entsteht. Trifft sie auf Gestein, das zum Beispiel Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Calciumsilicat ( $\text{CaSiO}_3$ ) enthält, kann sie dieses verwittern, d. h. auflösen. Dabei entstehen unter anderem Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) und Calcium-Ionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

---

<sup>12</sup> Subduktionszonen sind Bereiche, in denen Subduktion stattfindet. Bei der Subduktion wird Lithosphäre in den Erdmantel aufgenommen. Die Unterplatte wird unter die Oberplatte hinabgeführt. Das subduzierte Gesteinsmaterial erleidet bei relativ geringen Temperaturen unter steigendem Druck zunächst mechanische Entwässerung von Kluft- und Porenwässern und dann metamorphe Veränderungen. Von Subduktion ist fast ausschließlich ozeanische Lithosphäre betroffen. Deren Dichte begünstigt ein Absinken in den Mantel (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).



Die Carbonatverwitterung stellt einen Kohlenstofffluss von der Atmosphäre und der Lithosphäre in die Hydrosphäre dar. Die Silicatverwitterung ist dagegen allein mit einem Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre in die Hydrosphäre verbunden. Die Verwitterungsprodukte werden über Flüsse in den Ozean verbracht. Insbesondere Calcium-Ionen und Carbonat-Ionen (siehe [1]) dienen dort dem Plankton zum Aufbau von organischem Material und Kalkskeletten. Die Carbonatbildung durch Organismen ist die Umkehrreaktion der Reaktion [6]. Diese Umkehrreaktion beschreibt auch die chemische Ausfällung von Carbonaten auf Grund spezifischer Temperatur-, Druck-, pH-Wert- und Salzgehaltsbedingungen des Wassers.



Das bei der Carbonatverwitterung (siehe [6]) aus der Luft aufgenommene Kohlenstoffdioxidmolekül wird bei der Carbonatbildung wieder freigesetzt. Zunächst physikalisch gelöst ( $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ ), kann es letztlich wieder in die Atmosphäre diffundieren. Dagegen wird von den zwei bei der Silicatverwitterung (siehe [7]) aus der Luft aufgenommenen Kohlenstoffdioxidmolekülen nur eines bei der Carbonatbildung wieder freigesetzt. Das zweite Kohlenstoffdioxidmolekül fließt in Form von Carbonat in die Sedimente der Lithosphäre.

Der Prozess der Sedimentbildung heißt Sedimentation. Durch Ablagerung von festen Partikeln entsteht durch die Wirkung der Zentrifugal- und der Schwerkraft Sediment. Sedimentation setzt ein, wenn die Sinkgeschwindigkeit der Partikel größer ist als die turbulenzbedingte vertikal entgegengesetzte Komponente des Transportmediums, wie Wasser, Luft und Eis. Sie ist abhängig von der Größe, Dichte und Form der Partikel, der Strömungsgeschwindigkeit, der Sättigung sowie der Turbulenz. Zu den chemisch ausgefällten Carbonaten und den Kalkskeletten der Organismen kommen die organischen Reste abgestorbener Meeresorganismen. Der Sedimentationsprozess biogenen Materials wird als „biologische Kohlenstoffpumpe“ bezeichnet. Man schätzt die Sedimentationsrate beider Vorgänge zusammen auf etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich (IPCC, 2001). Die Sedimentation abgestorbener organischer Materials im Ozean in Verbindung mit dem Diageneseprozess führt zur Bildung von Erdöl und Erdgas.

### 1.2.5 Der Kohlenstoffkreislauf im Ozean

Der Kohlenstoffkreislauf im Ozean umfasst alle Prozesse, die den Fluss von Kohlenstoff oder seinen chemischen Verbindungen im Meer bestimmen. Dazu zählen Kohlenstoffflüsse zwischen der Atmosphäre und dem Meerwasser, zwischen den marinen Organismen und dem Meerwasser sowie zwischen dem Meerwasser und dem Meeresboden. Eine zentrale Rolle spielen die Kohlenstoffspeicher *Meeresorganismen* und *Wasser*. Das Leben im Ozean, mit seinen spezifischen Nahrungsbeziehungen und Ansprüchen an die Umgebung, beeinflusst die Transportvorgänge ebenso wie die spezifischen Eigenschaften des Meerwassers. Insbesondere werden die Kohlenstoffflüsse im Ozean in hohem Maße von den dort vorherrschenden Strömungsverhältnissen bestimmt.

Im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser, das etwa bis zu einer Tiefe von 150 Metern reicht, werden die Kohlenstoffflüsse vor allem durch Fotosynthese, Atmung und Mineralisierung bestimmt. Das Phytoplankton baut jährlich durch Fotosynthese eine vergleichsweise große Menge von etwa 103 Gigatonnen Kohlenstoff in organische Verbindungen ein (IPCC, 2001, Lochte, 2004). Das beteiligte Kohlenstoffdioxid entstammt dabei nicht direkt der Atmosphäre, sondern wird dem Wasser entzogen. Dabei stellen die marinen Organismen, mit ein bis drei Gigatonnen Kohlenstoff, nur einen sehr kleinen Speicher dar (siehe Tab. 1 auf Seite 23). 58 Gigatonnen Kohlenstoff werden jährlich wieder vom Phytoplankton veratmet und gelangen ins Wasser (IPCC, 2001, Lochte, 2004). Weitere 34 Gigatonnen Kohlenstoff werden jährlich durch die Atmung heterotropher Organismen und durch Mineralisierungsprozesse an das Oberflächenwasser abgegeben (IPCC, 2001, Lochte, 2004). Von den jährlich bei der Fotosynthese in organische Verbindungen eingebauten 103 Gigatonnen Kohlenstoff werden also 92 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr<sup>13</sup> wieder in Form von gelöstem anorganischem Kohlenstoff (DIC<sup>14</sup>) frei. Die beschriebenen Flüsse sind sehr effizient und Teil des kurzfristigen Kohlenstoffkreislaufs (siehe Kapitel 1.2.3 auf Seite 26 ff.).

Im Oberflächenwasser ist nur ein relativ kleiner Teil des Kohlenstoffs der Hydrosphäre enthalten. Der größte Teil ist im Tiefenwasser gespeichert. Er ist für längere Zeit vom Austausch mit der Atmosphäre abgeschnitten. Thermohaline Schichtung<sup>15</sup> kann den Stofftransport zwischen den Schichten unterbinden. Sie beruht auf Temperatur- und Salzgehaltsunterschieden. Wassermassen mit einer geringeren Dichte lagern sich über Wassermassen mit einer höheren Dichte, d. h. warme Wassermassen lagern sich über kältere und salzarme Wassermassen lagern sich über salzreichere. Der Tiefenbereich im Wasser, in

---

<sup>13</sup> Die Summe aus 58 Gigatonnen Kohlenstoff (autotrophe Respiration) und 34 Gigatonnen Kohlenstoff (heterotrophe Respiration) beträgt 92 Gigatonnen Kohlenstoff.

<sup>14</sup> DIC (englisch: Dissolved Inorganic Carbon): gelöster anorganischer Kohlenstoff; dazu zählen gelöstes Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ ), Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-_{(\text{aq})}$ ) und Carbonat-Ionen ( $\text{CO}_3^{2-}_{(\text{aq})}$ ).

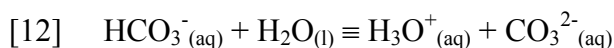
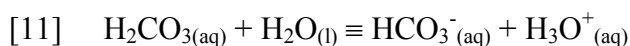
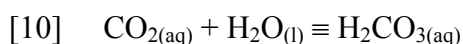
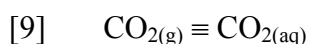
<sup>15</sup> Thermohalin (griechisch: thermós – warm, halós – Salz).

dem eine sprunghafte Veränderung der Dichteverhältnisse in vertikaler Richtung aufgrund von Temperatur- und Salzgehaltsunterschieden auftritt, wird thermohaline Sprungschicht genannt. Im Wasser gelöster Kohlenstoff kann diese Thermohalokline nicht überwinden. Thermohaline Schichtungen können aufgehoben werden. Ändern sich Temperatur und Salzgehalt von Wassermassen kommt es zu thermohalinen Zirkulation. Wasser mit einer höheren Dichte beginnt abzusinken und im Sog des herabsinkenden Wassers strömt Oberflächenwasser nach. Für die Kohlenstoffflüsse aus oberflächennahen in tiefere Wasserschichten sind vor allem die *physikalische Kohlenstoffpumpe* (siehe Seite 32 ff.) und die *biologische Kohlenstoffpumpe* (siehe Seite 34 ff.) verantwortlich.

### **Physikalische Kohlenstoffpumpe**

Die Gesamtheit aller Prozesse, die den vertikalen Transport von gelöstem anorganisch Kohlenstoff (DIC) in die Tiefen des Ozeans bestimmen werden als „physikalische Kohlenstoffpumpe“ bezeichnet. Sie reicht von der Diffusion der Kohlenstoffdioxidmoleküle aus der Atmosphäre in die Hydrosphäre, über den Lösungsprozess von Kohlenstoffdioxid in Wasser bis zum Absinken von spezifisch dichterem Oberflächenwasser in die Tiefen des Ozeans, wodurch gelöster anorganischer Kohlenstoff für eine gewisse Zeit vom Austausch mit der Atmosphäre ausgeschlossen ist.

Die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre werden durch die Prozesse Diffusion und Löslichkeit von Gasen bestimmt. An der Wasseroberfläche, der Grenzschicht zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre findet ein permanenter Stoffaustausch statt. Moleküle der Luftgase, wie zum Beispiel Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, sowie Luftverunreinigungen, wie zum Beispiel Fluor-Kohlenwasserstoffe, sind in ständiger Bewegung. Treffen sie auf die Wasseroberfläche, können sie diese durchdringen. Zwischen den Wassermolekülen bewegen sie sich weiter. Gleichzeitig gelangen andere Moleküle wieder in die Luft. Die Ortsveränderung der Moleküle geschieht durch Diffusion. Bei der Diffusion von Gasmolekülen in Wasser handelt es sich um einen physikalischen Lösungsvorgang. Das Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre löst sich außergewöhnlich gut in Wasser. Es reagiert mit Wasser unter Bildung von Hydroxonium-Ionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) und Carbonat-Ionen ( $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ ) nach folgender Gleichgewichtsreaktion:





Die Mischungsschicht der Ozeane, d. h. die obere, ständig umgewälzte Schicht von einigen hundert Metern Dicke, nimmt gegenwärtig jährlich etwa 90 Gigatonnen Kohlenstoff der Atmosphäre auf und gibt 88 Gigatonnen wieder ab (IPCC, 2001)<sup>16</sup>. Wesentlich schwächer ist der Austausch zwischen der Mischungsschicht und den tieferen, stabil geschichteten Wassermassen. 33 Gigatonnen Kohlenstoff werden im Jahr in die Tiefen transportiert und 42 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten (IPCC, 2001)<sup>17</sup>. Diese Flussraten können sich ändern. Sie stehen im ständigen Wechselspiel mit anderen Systemen, wie zum Beispiel dem Klimasystem.

Die physikalische Kohlenstoffpumpe ist vor allem im Nordatlantik und dem antarktischen Zirkumpolarstrom aktiv. Dort kommt es zum Absinken gewaltiger Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern. Die beschriebene Tiefenwasserbildung ist Teil eines erdumspannenden Strömungssystems. Es wird auch *großes marines Förderband*<sup>18</sup> genannt. In verschiedenen Etagen durchziehen große zusammenhängende Meeresströmungen den Ozean. Sie erstrecken sich vom Nordatlantik über das antarktische Zirkumpolarmeer bis zum Indik, Nordpazifik und zurück. In den Tropen und Subtropen erwärmt sich das Wasser aufgrund der starken Sonneneinstrahlung. Hohe Verdunstungsraten führen zu einem relativ hohen Salzgehalt. Im Atlantik strömt warmes, salzreiches Oberflächenwasser aus den Subtropen über den Äquator und den Golf von Mexiko an der amerikanischen Ostküste entlang in subpolare Gewässer zwischen Grönland, Island und Norwegen und in die Labradorsee. Diese Meeresströmung ist als Golfstrom, und ihr nordöstlicher Ausläufer als Nordatlantikstrom, bekannt. Arktische Winde kühlen die Wassermassen auf dem Weg nach Norden ab. Zudem wird durch die Bildung von Meereis der ohnehin schon hohe Salzgehalt noch weiter erhöht. Die Dichte des Wassers steigt in so hohem Maße, dass gewaltige Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern absinken. Mit dem Wasser werden große Mengen atmosphärischen Kohlenstoffs in Form von anorganisch gelöstem Kohlenstoff aus den oberflächennahen in tiefere Schichten verfrachtet. Im Sog des herabsinkenden Wassers strömen warme, salzreiche Wassermassen aus der Karibik nach, die sich abkühlen und dem Abwärtstrend folgen. In der Tiefe fließen die Wassermassen als nordatlantisches Tiefenwasser nach Süden über den Äquator in den antarktischen Zirkum-

---

<sup>16</sup> Vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002) und Lochte (2004): Kohlenstofffluss von Atmosphäre in Hydrosphäre erreicht 92 GtC/Jahr und Kohlenstofffluss von Hydrosphäre in Atmosphäre erreicht 90 GtC/Jahr.

<sup>17</sup> Vgl. Lochte (2004): 34,6 Gigatonnen Kohlenstoff werden im Jahr in die Tiefen transportiert und 42 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten; Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002): 92 Gigatonnen Kohlenstoff werden im Jahr in die Tiefen transportiert und 100 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten.

<sup>18</sup> Das *große marine Förderband* (englisch: the great ocean conveyor belt) wird auch als globale thermohaline Zirkulation bezeichnet, da es vor allem durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben wird, die auf unterschiedliche Temperaturen und unterschiedlichen Salzgehalt zurückzuführen sind. Zum Teil ist das Strömungssystem aber auch windgetrieben oder beruht auf Niveauunterschieden des Meeresbodens.

polarstrom. Von dort strömen sie als Tiefenwasser nach Norden in den Indik und Pazifik, steigen in höhere Wasserschichten auf und fließen in den Atlantik zurück. Gelangen die Wassermassen wieder an die Meeresoberfläche geben sie unter anderem das mitgeführte Kohlenstoffdioxid wieder an die Atmosphäre ab. Für den Weg auf dem großen marinen Förderband benötigt das Wasser mindestens 1.000, möglicherweise aber auch 10.000 Jahre. Tiefenwasser, das sich im Nordatlantik bildet, fließt nur sehr langsam. Es bewegt sich mit etwa 0,36 Kilometer pro Stunde. Der Fluss des mitgeführten Kohlenstoffdioxids zählt damit aber immer noch zum kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.3 auf Seite 26 ff.). Würden sich die Ozeanströmungen oder die Tiefe der vertikalen Zirkulation des Wassers verändern, hätte dies vermutlich Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf.

### **Biologische Kohlenstoffpumpe**

Die biologische Kohlenstoffpumpe umfasst die Gesamtheit aller Prozesse, die den Transport von durch biologische Aktivität entstandenen organischen und anorganischen Kohlenstoffverbindungen wie zum Beispiel abgestorbene Organismen und Kotballen in die Tiefen des Ozeans bestimmen. Jährlich gelangen etwa 11 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von organisch gelöstem Kohlenstoff (DOC<sup>19</sup>) und kleinen organischen Partikeln (POC<sup>20</sup>) aus dem Oberflächenwasser in die Tiefe des Ozeans (IPCC, 2001, Lochte, 2004)<sup>21</sup>. Durch die physikalische Kohlenstoffpumpe werden im Vergleich dazu etwa 33 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in Form von gelöstem anorganischem Kohlenstoff (DIC) in die Tiefe transportiert (IPCC, 2001)<sup>22</sup>. Der organisch gelöste Kohlenstoff und die kleinen organischen Partikeln werden fast ausschließlich durch die Atmung heterotropher Organismen und Mineralisierungsprozesse in der Wassersäule in anorganisch gelösten Kohlenstoff umgewandelt.

Einige marine Organismen, wie zum Beispiel die Kalkflagellaten, sind in der Lage aus Hydrogencarbonat-Ionen Kalkschalen aufzubauen. Durch die biogene Carbonatbildung werden jährlich 0,7 Gigatonnen Kohlenstoff dem Wasser entzogen und in Organismen eingebaut (IPCC, 2001). In Flachwasserregionen werden etwa 0,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich in Form von Kalkschalenresten und 0,1 Gigatonnen in Form von kleinen organi-

---

<sup>19</sup> DOC (englisch: **D**issolved **O**rganic **C**arbon): gelöster organischer Kohlenstoff.

<sup>20</sup> POC (englisch: **P**articulate **O**rganic **C**arbon): partikulärer organischer Kohlenstoff.

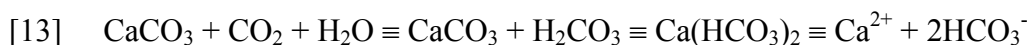
<sup>21</sup> Vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002): 10 GtC/Jahr.

<sup>22</sup> Vgl. Lochte (2004): 34,6 Gigatonnen Kohlenstoff werden im Jahr in die Tiefen transportiert und 42 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten; Ittekkot, Rixen, Suthhof et al. (2002): 92 Gigatonnen Kohlenstoff werden im Jahr in die Tiefen transportiert und 100 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten.

schen Partikeln sedimentiert (IPCC, 2001). 0,1 Gigatonnen Kohlenstoff des an den Küsten sedimentierten biogenen Calciumcarbonats wird jährlich wieder gelöst (IPCC, 2001).

Abgestorbene kalkschalentragende Organismen können auch in tiefere Wasserschichten absinken. 0,4 Gigatonnen Kohlenstoff werden jährlich in Form von Kalkschalenresten aus den oberflächennahen Schichten entfernt (IPCC, 2001). Das Calciumcarbonat löst sich zu einem großen Teil im Meerwasser. Es wird in anorganisch gelösten Kohlenstoff überführt. Dieser gelangt über Strömungssysteme letztlich wieder in das Oberflächenwasser und steht dem Austausch mit der Atmosphäre wieder zur Verfügung.

Nur sehr geringe Kohlenstoffmengen aus biogenen Prozessen werden in großen Tiefen am Ozeanboden sedimentiert. Nach heutigen Schätzungen lagern sich etwa 0,01 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von organisch gelöstem Kohlenstoff und kleinen organischen Partikeln am Meeresboden ab (IPCC, 2001). Sie bilden die Ausgangsstoffe für die Erdölbildung und Erdgasentstehung. Zudem sedimentieren in großen Tiefen etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Kalkschalenresten (IPCC, 2001). Aus diesem Sediment kann über lange Zeiträume hinweg durch Diagenese Kalkstein entstehen (siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff.). In sehr großen Tiefen des Ozeans kommt es aber nicht zur Sedimentation von organischem Material und Calciumcarbonat. Ab einer bestimmten Wassertiefe geht Calciumcarbonat in Lösung. Man bezeichnet diese Wassertiefe daher als Carbonat-Kompensationstiefe. Oberhalb der Carbonat-Kompensationstiefe können Kalkablagerungen auftreten. Unterhalb der Carbonat-Kompensationstiefe findet man keine Kalkablagerungen. Herunterrieselnde Kalkschalen werden aufgelöst. Der Calciumcarbonatlösungsprozess bzw. die Calciumcarbonatausfällung wird durch folgende chemische Gleichgewichtsreaktion beschrieben:



Die Carbonat-Kompensationstiefe ist abhängig von der Temperatur, dem hydrostatischen Druck, dem pH-Wert und dem Salzgehalt des Wassers. Mit zunehmender Wassertiefe steigt, aufgrund des höheren hydrostatischen Drucks und der meist niedrigeren Temperatur, die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser. Das Tiefenwasser des Ozeans enthält daher meist mehr gelöstes Kohlenstoffdioxid als das Wasser oberflächennaherer Schichten. Dadurch wird das Gleichgewicht in Richtung Calciumcarbonatlösung verschoben. Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid und damit von Calciumcarbonat steigt zudem mit zunehmendem pH-Wert und abnehmendem Salzgehalt. Die beschriebenen Faktoren, die die Carbonat-Kompensationstiefe beeinflussen, variieren in den unterschiedlichen Bereichen des Ozeans. Daher kommt es zu regional verschiedener Sedimentzusammensetzung. Im Atlantik liegt die Carbonat-Kompensationstiefe bei ca. 5 km Wassertiefe, im Pazifik bei 2,5 km. Der Atlantik ist im Vergleich zum Pazifik reich an kalkhaltigen Sedimenten. 68 % der Fläche der atlantischen Tiefsee ist von Kalkschlämmen bedeckt, im Pazifik dagegen

nur 36 % der Fläche. Ein Grund dafür könnte der erhöhte Salzgehalt des Atlantiks sein, welcher das Gleichgewicht in Richtung Calciumcarbonatausfällung verschiebt. Der Hauptgrund für die große Carbonat-Kompensationstiefe im Atlantik ist aber der im Vergleich zum Pazifik relativ geringe Kohlenstoffdioxidgehalt des Tiefenwassers.

Letztlich gelangen jährlich nur etwa 10 % der biogenen Substanz in tiefere Wasserschichten. Dieses Material, das die oberen durchmischten Wasserschichten verlässt, also tiefer als ca. 100 m absinkt, verbleibt für längere Zeit im Ozean. In den mittleren Stockwerken des Ozeans, in Tiefen von mehr als 500 m, wird es für Jahrzehnte bis Jahrhunderte gespeichert, bevor es wieder durch Auftrieb die Oberfläche erreicht und seinen Vorrat an Kohlenstoffdioxid mit der Atmosphäre austauschen kann. Weiterer Abbau durch Zooplankton und Bakterien im tiefen Ozean sorgt dafür, dass schließlich nur etwa 1 bis 2 % der ursprünglichen Primärproduktion am Meeresboden der Tiefsee, d. h. in ca. 3000 bis 4000 m Tiefe, anlangt. Dort dient es zu einem großen Teil bodenlebenden Tieren als Nahrung und wird zu Kohlenstoffdioxid veratmet. Dieses Material ist für Jahrtausende dem Austausch mit der Atmosphäre entzogen. Auch in den Sedimenten der Tiefsee, die durch die abgesunkenen anorganischen und organischen Partikel gebildet werden, bleibt noch ein kleiner Rest (etwa 0,01 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr (IPCC, 2001)) der ursprünglichen Primärproduktion als schwer abbaubarer, organischer Kohlenstoff erhalten. Dieses Material ist für Jahrtausende gespeichert.

Der Ozean wird, neben der Diffusion von Kohlenstoffdioxid an der Ozeanoberfläche, auch durch Zuflüsse vom Land mit Kohlenstoff gespeist. Jährlich gelangen etwa 0,8 Gigatonnen Kohlenstoff auf diesem Wege ins Meer (IPCC, 2001). 0,2 Gigatonnen werden davon in Form von Hydrogencarbonat-Ionen als Produkt der chemischen Verwitterung von Carbonatgestein und Silikatgestein (IPCC, 2001; siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff.) in den Ozean transportiert. Dieser Kohlenstoff entstammt der Atmosphäre. Weitere 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff fließen ebenfalls in Form von Hydrogencarbonat-Ionen als Produkt der chemischen Verwitterung von Carbonatgestein in den Ozean (IPCC, 2001; siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff.). Dieser Kohlenstoff entstammt der Lithosphäre. Die restlichen 0,4 Gigatonnen werden als gelöster organischer Kohlenstoff in den Ozean transportiert (IPCC, 2001). Sie entstammen der Pedosphäre.

Die biologische Kohlenstoffpumpe ist vor allem in Regionen des Ozeans wirksam, in denen die Primärproduktion hoch ist. Dazu zählen die subpolaren Breiten und die Auftriebsgebiete. Die tropischen Regionen zeigen wenig Produktivität. Unter anderem aufgrund geringer Durchmischung des Wassers herrscht in diesen Gebieten Mineralsalz-mangel. Sie werden daher auch als „Wüsten des Meeres“ bezeichnet. Das meiste Kohlenstoffdioxid wird in den höheren Breiten (> 40° Nord oder Süd) aufgenommen. Neben der hohen Primärproduktion wirken sich hier die Abkühlung und das Absinken des Meerwassers aus. Tropische Regionen, insbesondere diejenigen, in denen durch Auftrieb Tiefenwasser an die

Oberfläche gelangt, geben Kohlenstoffdioxid an die Atmosphäre ab. Diesem Kohlenstoffdioxidfluss wirkt die hier gleichzeitig vorliegende hohe Primärproduktion entgegen. Dadurch wird viel Kohlenstoffdioxid gebunden und in den tiefen Ozean exportiert.

Die Effektivität der biologischen Kohlenstoffpumpe hängt unter anderem vom Mineralsalzangebot und von Strömungssystemen, aber auch vom Fressverhalten des Zooplanktons ab. In Bezug auf die Bereitstellung von Mineralsalzen in der lichtdurchfluteten Zone, dem Ort der Primärproduktion, werden zwei Produktionsformen unterschieden, die „Neue Produktion“ und die „Regenerierte Produktion“. „Neue Produktion“ ist durch den Transport „neuer Mineralsalze“ in die lichtdurchflutete Zone des Wassers, den Ort der Primärproduktion, gekennzeichnet. „Neue Mineralsalze“ werden durch Wasserströmungen aus der Tiefe in die oberflächennahen Schichten transportiert. Dieses geschieht durch winterliche Durchmischung, in großen Wirbeln oder durch Auftrieb, der am Äquator und an manchen Küsten auftritt. „Neue Mineralsalze“ gelangen also von außerhalb an den Ort der Primärproduktion. Bei der „Regenerierten Produktion“ stammen die Mineralsalze hingegen aus der lichtdurchfluteten Zone des Wassers. Sie werden also an dem Ort der Primärproduktion und zu der Zeit, an dem sie stattfindet, von Konsumenten freigesetzt, mithin nicht von außerhalb in das System eingetragen. Die Konsumenten bauen organisches Material vollständig ab, sie remineralisieren es.

„Neue Produktion“ und „Regenerierte Produktion“ können jahreszeitlich verschieden und auch räumlich getrennt auftreten. In geographischen Breiten, in denen sich die Sonneneinstrahlung und die vertikale Durchmischung im Laufe eines jeden Jahres ändern, wechseln sich „Neue Produktion“ und „Regenerierte Produktion“ ab. Die vertikale Durchmischung im Winter sorgt für einen Mineralsalztransport aus tieferen in oberflächennahe Wasserschichten. Im Frühjahr, wenn die Lichtverhältnisse gut genug sind, vermehrt sich das Phytoplankton, insbesondere Kieselalgen, explosionsartig. Diese Phase entspricht „Neuer Produktion“, da „neue Mineralsalze“ aus der Tiefe an den Ort der Primärproduktion verfrachtet werden. Zum Sommer baut sich langsam eine Sprungschicht auf. Diese wirkt wie eine Barriere zwischen tieferen und oberflächennahen Wasserschichten. Die „Neue Produktion“ wird von der „Regenerierten Produktion“ abgelöst. Das Phytoplankton, insbesondere Panzergeißelflagellaten, nutzt Mineralsalze, die vom Zooplankton oder Bakterien in der lichtdurchfluteten Zone, dem Ort der Primärproduktion, freigesetzt werden. Dieses Recycling-system wird als „mikrobielle Schleife“ bezeichnet. Im Herbst baut sich die Sprungschicht langsam wieder ab. Vertikale Durchmischung setzt ein. „Neue Mineralsalze“ können so aus tieferen Wasserschichten mit der Strömung in die lichtdurchflutete Zone transportiert werden. Neben dieser zeitlichen Abfolge von „Neuer Produktion“ und „Regenerierter Produktion“ existiert auch ein räumliches Nebeneinander der beiden Produktionstypen.

### 1.2.6 Der terrestrische Kohlenstoffkreislauf

Der terrestrische Kohlenstoffkreislauf umfasst alle Prozesse, die den Fluss von Kohlenstoff oder seinen chemischen Verbindungen an Land bestimmen. Eine zentrale Rolle spielen die Kohlenstoffspeicher *Landorganismen*, *Böden* und *Atmosphäre*. Die Landpflanzen speichern etwa 500 Gigatonnen Kohlenstoff, die Böden mit etwa 1.500 Gigatonnen fast doppelt so viel (IPCC, 2001, vgl. Tab. 1 auf Seite 23). Durch die Photosynthese bauen die Pflanzen Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre in organisches Material ein (etwa 120 GtC/Jahr (IPCC, 2001, Lochte, 2004)). Die Hälfte der jährlich aufgenommenen Kohlenstoffmenge wird über die Atmung der Pflanzen wieder frei (60 GtC/Jahr (IPCC, 2001, Lochte, 2004)). Der Rest geht in Form von pflanzlichem organischem Material in das Wachstum der Biomasse ein. Das pflanzliche Material wird von Tieren aufgenommen oder stirbt ab und wird von Pilzen und Bakterien zersetzt (z. B. Laubabbau). Auch Tiere sterben und werden abgebaut. Letztlich gelangt der größte Teil des in Biomasse festgesetzten Kohlenstoffs über die Atmung wieder in die Atmosphäre (55 GtC/Jahr (IPCC, 2001)). Ein kleiner Teil wird auch durch natürliche und anthropogene Brände frei (4 GtC/Jahr (IPCC, 2001)). Jährlich verbleibt also nur etwa 1 Gigatonne Kohlenstoff in Form organischer Substanzen, dem Humus, im Boden zurück. Ein Teil davon dient der Kohlebildung. Ein anderer Teil wird in organische Verbindungen zerlegt, die von Bodenwasser ausgewaschen werden und als gelöste organische Kohlenstoffe ins Meer gelangen (0,4 GtC/Jahr (IPCC, 2001)).

### 1.2.7 Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf

In den letzten 200 Jahren ist der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre relativ stark angestiegen. Von besonderem Interesse ist die Frage nach der klimatischen Bedeutung dieses Anstiegs. Die globale Temperatur hat sich von 1860 bis 2000 um etwa 0,6° C erhöht. Die Temperaturen des letzten Jahrzehnts waren etwa 0,35° C höher als das Mittel der Jahre 1961 bis 1990 (Referenzzeit). Vor 1910 lagen die Temperaturen etwa 0,3° C niedriger als die der Referenzzeit. In einigen Regionen der Erde, wie zum Beispiel in Mittel- und Nordeuropa, Nordamerika, China, Australien und Neuseeland, wurde in den letzten Jahrzehnten eine Abnahme der Frosttage und eine Zunahme der Tage mit extrem hohen Temperaturen beobachtet. Die Untersuchung von Eisbohrkernen lässt einen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration und der Temperaturerhöhung vermuten.

Neben der Klimarelevanz veränderter Kohlenstoffflüsse interessieren auch die Rückkopplungen des Klimasystems auf den globalen Kohlenstoffkreislauf. Änderungen des Klimas, wie z. B. steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmengen oder sich häufende starke Winde, können die Kohlenstoffflüsse zwischen den einzelnen Speichern beeinflus-

sen. Um die Zusammenhänge zwischen Kohlenstoffkreislauf und Klima besser verstehen zu können, müssen unter anderem die Prozesse untersucht werden, die die Stoffflüsse des durch menschliche Aktivität in der Atmosphäre angereicherten Kohlenstoffs in andere Speicher bestimmen. Je nach Intensität der Kohlenstoff bindenden und Kohlenstoff freisetzenden Prozesse können die Atmosphäre, der Ozean und die terrestrische Biosphäre sowohl eine Kohlenstoffquelle als auch eine Kohlenstoffsenke im System Erde darstellen.

Aus anthropogenen Quellen gelangen etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in die Atmosphäre<sup>23</sup>. Gegenwärtig steigt der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre jedoch nur um etwa  $3,3 \pm 0,1$  Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr an (IPCC, 2001). Der Ozean nimmt pro Jahr etwa  $1,9 \pm 0,6$  Gigatonnen Kohlenstoff auf, die Landbiomasse etwa  $0,2 \pm 0,7$  Gigatonnen Kohlenstoff (IPCC, 2001). Es stellt sich die Frage, ob diese Kohlenstoffspeicher auch in Zukunft überwiegend Kohlenstoffsenken darstellen und damit dem anthropogenen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration der Atmosphäre entgegenwirken. Modellberechnungen, die den Anstieg der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration und Änderungen des Klimas berücksichtigen, zeigen die terrestrische Biosphäre für das 21. Jahrhundert überwiegend als Kohlenstoffsenke. Die Flussraten nehmen jedoch bei den meisten Modellen ab. Auch der Ozean wird vermutlich in Zukunft nicht mehr so viel CO<sub>2</sub> aufnehmen wie bisher.

Durch die Erhöhung der Kohlenstoffdioxidemissionen diffundiert mehr Kohlenstoffdioxid in den Ozean. Dies geschieht so lange, bis sich ein neues Gleichgewicht der Partialdrücke von Kohlenstoffdioxid eingestellt hat. Welche Auswirkungen kann die Erhöhung der Kohlenstoffdioxidkonzentration im Ozean haben? Da der Ozean ein relativ großer Kohlenstoffspeicher ist, wirkt sich die Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts bis jetzt erst relativ wenig aus. Es sind jedoch erste Anzeichen einer Veränderung erkennbar. Bedingt durch größere Mengen gelösten Kohlenstoffdioxids im Meerwasser sinkt der pH-Wert. Dies kann die Kalkbildung durch Korallen oder kalkschaliges Phytoplankton behindern. Welche Auswirkungen dieses Phänomen auf die Prozesse und die Nahrungsbeziehungen im Meer hat ist noch unklar.

Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser ist von zahlreichen Faktoren, wie z. B. der Temperatur abhängig. Eine Zunahme der Lufttemperatur und damit der Meeresoberflächentemperatur bewirkt eine Verringerung der Löslichkeit von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid in Meerwasser. Dies könnte bedeuten, dass mehr Kohlenstoff aus dem Ozean in die Atmosphäre entweicht als aus dieser wieder aufgenommen wird. Weitaus größere Auswirkungen erwartet man jedoch durch Klimaänderungen, die aus der Erhöhung des

---

<sup>23</sup> Kohlenstoffdioxidemissionen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle sowie aus der Herstellung von Zement ( $5,4 \pm 0,3$  GtC/Jahr), Änderungen der Landnutzung, vor allem der Brandrodung von Wäldern ( $1,7$  GtC/Jahr) (IPCC, 2001).

Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre resultieren können. Erwärmung, höhere Niederschläge und veränderte Windbedingungen beeinflussen Strömungssysteme des Ozeans. Man nimmt an, dass der Ozean generell weniger tief durchmischt wird. Dadurch würde die physikalische Aufnahmefähigkeit des Wassers für Kohlenstoffdioxid sinken (physikalische Kohlenstoffpumpe, siehe Seite 32 ff.). Zudem würde sich die Mineralsalzversorgung im Oberflächenwasser verändern. Geringere Durchmischung hätte eine Verringerung des Mineralsalzgehalts der oberflächennahen Schichten zur Folge. Dadurch könnte die Effektivität der biologischen Kohlenstoffpumpe (siehe Seite 34 ff.) in einigen Regionen des Ozeans vermindert werden.

Mit der Zunahme der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration kann auch eine Steigerung der Fotosyntheserate verbunden sein. Veränderte Landnutzung, wie zum Beispiel im Falle von Aufforstungen, kann ebenfalls ein Grund für die vermehrte Kohlenstoffdioxidaufnahme des Speichers Landvegetation sein. Weitaus größere Auswirkungen erwartet man jedoch durch Klimaänderungen, die aus der Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre resultieren können. Erwärmung, höhere oder niedrigere Niederschläge und die Abtragung der Böden könnten die Aufnahmefähigkeit terrestrischer Kohlenstoffspeicher beeinflussen.

Gegenwärtig sind vor allem die borealen Nadelwälder (Taiga) und die Wälder der nördlichen gemäßigten Zone eine wichtige Kohlenstoffsенке. Bei der Fotosynthese wird mehr atmosphärisches Kohlenstoffdioxid in organische Verbindungen eingebaut als durch Atmung, Mineralisierung und Verbrennung wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Wälder umfassen sowohl Elemente der terrestrischen Biosphäre als auch Elemente der Pedosphäre. Lebendes organisches Material (z. B. Kronen, Stämme und Wurzeln der Bäume) zählt ebenso dazu wie totes organisches Material (z. B. Streu und Humus). Die Wälder im System Erde speichern zusammen etwa 1.000 Gigatonnen Kohlenstoff. Die Pflanzen in den Wäldern nördlich des Breitengrades 30° Nord haben in den Jahren 1981 bis 1999 etwa 0,68 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr mehr aus der Atmosphäre aufgenommen, als sie an diese wieder abgegeben haben. Vor allem die Wälder in den USA, in Nord- und Osteuropa sowie in Russland haben mehr Kohlenstoff aufgenommen als abgegeben. Vermutlich sind dafür der Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration der Atmosphäre, die höheren Temperaturen und die damit verbundenen längeren Wachstumszeiten in nördlicheren Breiten verantwortlich. Bei hinreichender Lichtintensität und ausreichend Wasser steigt durch Zunahme des Kohlenstoffdioxidgehalts der Luft die Fotosyntheseleistung. Dieses Phänomen wird als Kohlenstoffdioxiddüngungseffekt bezeichnet. Die Öffnungszeiten der Spaltöffnungen, über die der Gasaustausch der Pflanzen erfolgt, sind geringer. Dadurch verringert sich der Wasserdampfverlust. Auch eine Temperaturerhöhung kann die Fotosyntheseleistung erhöhen. Weitere Gründe dafür, dass die Wälder als Senke gewirkt haben, sind sicherlich auch die erfolgreiche Bekämpfung von Waldbränden und die Wiederaufforstungen in



den USA, sowie die verbesserte Forstwirtschaft in den skandinavischen Ländern und der geringere Holzeinschlag in Russland gewesen. Gegenüber den aufgeführten Kohlenstoffsenken stellt ein großer Teil der kanadischen Wälder eine Kohlenstoffquelle dar. Vermutlich sind Waldbrände und Krankheitsbefall in Kanada dafür verantwortlich. Auch tropische Wälder sind eine Quelle für atmosphärischen Kohlenstoff.

Aller Voraussicht nach werden Veränderungen, als Folge des Kohlenstoffdioxidanstiegs der Atmosphäre und der Temperaturerhöhung, überwiegend in den borealen Nadelwäldern (Taiga) und den Wäldern der nördlichen gemäßigten Zone auftreten. In den höheren Breiten kann die Verlängerung der Vegetationsperiode die Primärproduktion erhöhen. Einige Pflanzenarten, denen ein Leben in diesen Breiten heute noch nicht möglich ist, könnten sich neu ansiedeln. Eine Ausdehnung der Wälder, vor allem in den höheren Breiten, würde dazu führen, dass mehr Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre in organische Verbindungen eingebaut wird. Andererseits würde durch die Ansiedlung von Bäumen auf baumfreien bis baumarmen subpolaren Flächen die Albedo<sup>24</sup> gesenkt werden. Dies hätte eine Temperaturerhöhung zur Folge.

Eine Erhöhung der oberflächennahen Temperatur hat unter anderem Einfluss auf den Wasserkreislauf des Systems *Erde*. Höhere Temperaturen treiben die Verdunstung an. Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ist in den letzten Jahrzehnten gestiegen und die globale Niederschlagsmenge hat zugenommen. Diese Veränderungen sind jedoch regional verschieden. Einige Gebiete zeichnen sich durch Niederschlagszunahme aus, andere durch Niederschlagsabnahme. In den mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel sind die Niederschlagsmengen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gestiegen. In einigen Regionen Afrikas und Asiens sind die Niederschlagsmengen zurückgegangen. Wälder reagieren sehr sensibel auf eine Verringerung des verfügbaren Wassers. Bereits eine globale Temperaturerhöhung um 1° C und eine damit verbundene Erhöhung der Verdunstung könnte ausreichen, um in bestimmten Regionen, wie zum Beispiel in den Tropen, das Waldwachstum stark zu verringern. Bei einer Verdoppelung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre wird wahrscheinlich ein Drittel aller Wälder wesentliche Veränderungen in der Artenvielfalt erleiden, besonders in höheren Breiten.

---

<sup>24</sup> Die *Albedo* (lateinisch: weiße Farbe) beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung. Sie ist damit ein Maß für das Reflektionsvermögen von Oberflächen. Die Albedo einer Oberfläche kann theoretisch Werte zwischen null und eins annehmen, wobei ein Wert von eins bedeutet, dass 100 % der auf die Oberfläche einfallenden Strahlung reflektiert wird. Helle Oberflächen haben eine hohe Albedo (Neuschnee: 0,7 – 0,95 bzw. 70 – 95 %, Sandflächen 0,18 – 0,28 bzw. 18 – 28 %). Je dunkler eine Oberfläche im sichtbaren Spektralbereich ist, desto mehr einfallende Strahlung wird absorbiert, d. h. desto kleiner ist ihre Albedo (Waldflächen 0,13 – 0,19 bzw. 13 – 19 %, Ackerflächen 0,07 – 0,1 bzw. 7 – 10 %, Wasserflächen 0,03 – 0,1 bzw. 3 – 10 %). Die globale Albedo, d. h. das Reflexionsvermögen des Gesamtsystems Erde beträgt etwa 0,3 bzw. 30 %. Die Albedo ist abhängig vom Einfallswinkel des Sonnenlichts, der atmosphärischen Trübung, dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre sowie der Bewölkung (siehe Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

## 2 Systemtheorie

Die Systemtheorie ermöglicht ein verbessertes Verständnis der Komplexität und Dynamik biologischer Systeme (Bossel, 1999). Zentraler Aspekt ist die Identifizierung des Systemverhaltens. Bei der Analyse biogeochemischer Kreisläufe sind vor allem Speichergrößen und ihre zeitlichen Veränderungen von Bedeutung. In Kapitel 2.1 wird eine Definition für den Begriff „System“ angegeben. Es werden der Zustand und die Entwicklung eines Systems beschrieben. Im Folgenden werden verschiedene Systemkategorien beschrieben (siehe Kapitel 2.2 auf Seite 45 f.). In Kapitel 2.3 auf Seite 46 werden besondere Systemeigenschaften genannt. In Kapitel 2.4 auf Seite 47 f. wird der Begriff Systemhierarchie charakterisiert. Es schließt sich eine Erklärung des Begriffs Systemanalyse an (siehe Kapitel 2.5 auf Seite 48 f.). Voraussetzung für die Ermittlung der Struktur- und Prozesseigenschaften von Systemen sind Modellbildung und der Einsatz geeigneter Systemdarstellungen. In Kapitel 2.6 auf Seite 48 wird daher der Aspekt Modellbildung thematisiert. Abschließend werden in Kapitel 2.7 auf Seite 49 ff. verschiedene systemische Darstellungsformen vorgestellt.

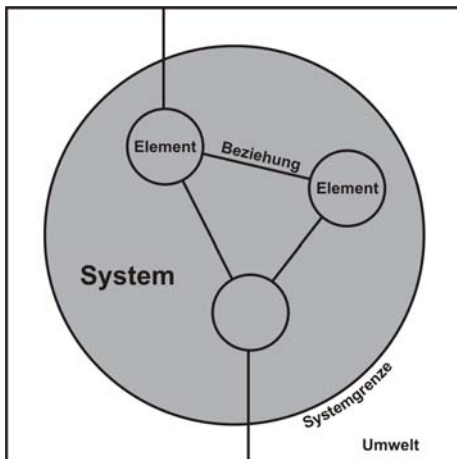
Für die Analyse biogeochemischer Stoffkreislaufsysteme ist neben dem systemtheoretischen Ansatz auch Interdisziplinarität von Bedeutung (siehe Kapitel 4 zur Systemkompetenz auf Seite 73 ff. und Kapitel 5 zur *Cognitive-Flexibility*-Theorie auf Seite 76 ff.).

### 2.1 Systemdefinition

Ein System besteht, vereinfacht gesagt, aus Elementen, die miteinander in bestimmten Beziehungen stehen. Der Begriff System beschreibt die Ordnung von Systemelementen in einem ganzheitlichen Zusammenhang (Der Große Brockhaus, 1980). Für das Verständnis von Ökosystemen und deren Komponenten, wie etwa Stoffkreisläufen, ist die Zusammenführung unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen mit zum Teil interdisziplinärem Ansatz notwendig (Lexikon der Geowissenschaften, 2002). Erst durch das Erkennen des Ineinandergreifens unterschiedlichster Prozesse und der Einbettung der Systemelemente in ein größeres Ganzes wird ein System verständlich. Zudem reicht es nicht, den Zustand eines Systems in der Momentaufnahme zu betrachten. Zu einem verbesserten Systemverständnis gelangt man erst, wenn auch die Entwicklung des Systems berücksichtigt wird.

Nach Bossel (1999) existiert ein System in einer Umwelt (siehe Abb. 2 auf Seite 43). Es besteht aus Elementen, die in bestimmten Beziehungen zueinander stehen. Eine Systemgrenze trennt das System von der Umwelt. Es gibt Beziehungen zwischen Elementen des

Systems und Elementen der Umwelt des Systems (Bossel, 1999)<sup>25</sup>. Bei den Beziehungen zwischen Elementen bzw. Systemen kann es sich sowohl um kausale Beziehungen, d. h. Wirkungsbeziehungen, als auch um stoffliche, energetische oder informatorische Beziehungen bzw. Stoff-, Energie- oder Informationsflüsse handeln (siehe Bossel, 1999 und Pahl-Wostl, 1999).



**Abb. 2:** Systemdefinition.

Der Zustand eines Systems wird durch Zustandsgrößen beschrieben. Eine Zustandsgröße ist eine Systemgröße, die den Zustand eines Systemelements angibt. Betrachtet man ein Systemelement, das einen Speicherspeicher repräsentiert, so wird der Zustand dieses Elements durch die Größe des Speichers angegeben. In diesem Fall bezeichnet man eine Zustandsgröße auch als Speichergröße des Systems. Zustandsgrößen haben Mengeneinheiten. Die Größe eines Speichers wird zum Beispiel in Litern oder Kilogramm angegeben, die Größe eines Energiespeichers in Kilojoule (kJ) und die Größe eines Informationsspeichers z. B. in Kilometern auf einer Kilometeranzeige eines Autos. Zustandsgrößen beziehen sich auf einen bestimmten Zeitpunkt. So enthält z. B. eine Badewanne (Speicher) zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Menge Wasser (Zustandsgröße).

Die zeitliche Entwicklung eines Systems zeigt sich in der Änderung seines Zustandes. Die zeitliche Aufeinanderfolge von verschiedenen Systemzuständen wird durch folgenden Zusammenhang beschrieben: Der „neue“ Zustand entspricht der Summe aus „altem“ Zustand und Änderung. Da der Zustand eines Systems durch Zustandsgrößen beschrieben wird,

---

<sup>25</sup> Bossel (1999) unterscheidet zwischen Umwelteinwirkungen und Verhaltensauswirkungen. Umwelteinwirkungen sind Einwirkungen aus der Umwelt des Systems auf das System. Verhaltensauswirkungen sind Wirkungen des Systems auf seine Umwelt. Die beschriebenen Beziehungen werden auch Input- und Outputrelationen genannt (Lexikon der Geowissenschaften, 2002).

zeigt sich die Änderung des Zustandes in der Änderung der Zustandsgrößen. Zustandsgrößen können nicht aus anderen Systemgrößen abgeleitet werden. Um den Wert einer Zustandsgröße  $Z$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_2$  ( $Z(t_2)$ ) berechnen zu können, muss man ihren Wert zu einem vorherigen Zeitpunkt  $t_1$  ( $Z(t_1)$ ) und ihre Änderung  $\Delta Z$  im Zeitintervall  $(t_1, t_2)$ , d. h. die Differenz zwischen ihrem Werten  $Z(t_2)$  und  $Z(t_1)$ , kennen. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$Z(t_2) = Z(t_1) + \Delta Z.$$

Die Änderungsrate lässt sich als Quotient aus Änderung der Zustandsgröße  $\Delta Z$  ( $\Delta Z = Z(t_2) - Z(t_1)$ ) und Zeitintervall  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) definieren:

$$\frac{\Delta Z}{\Delta t} = \frac{Z(t_2) - Z(t_1)}{t_2 - t_1}.$$

Somit wird die Zustandsgröße  $Z$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_2$  bestimmt durch die Summe aus der Zustandsgröße zu einem vorherigen Zeitpunkt  $t_1$  und dem Produkt von Änderungsrate und Zeitintervall.

$$Z(t_2) = Z(t_1) + \frac{\Delta Z}{\Delta t} \cdot \Delta t = Z(t_1) + \left( \frac{Z(t_2) - Z(t_1)}{t_2 - t_1} \right) \cdot (t_2 - t_1)$$

Die Änderung der Zustandsgrößen, d. h. die Änderung der Größen der Speicher eines Systems, erfolgt ausschließlich durch Zuflüsse und/oder Abflüsse. Durch Zuflüsse vergrößert sich eine Zustandsgröße im Laufe der Zeit, durch Abflüsse verringert sie sich. Zuflüsse bzw. Abflüsse können zeitlich variabel und auch strukturell verschieden sein. Sowohl die Zuflüsse und als auch die Abflüsse werden mit positiven Werten angegeben. Bezogen auf ein bestimmtes Zeitintervall  $(t_1, t_2)$ , ergibt sich der resultierende absolute Fluss  $F$ , aus der Differenz der Zuflüsse  $F_{IN}$  und Abflüsse  $F_{OUT}$ :

$$F(t_1, t_2) = F_{IN}(t_1, t_2) - F_{OUT}(t_1, t_2).$$

Im Zeitintervall  $(t_1, t_2)$  entspricht der Fluss  $F$  der Änderung  $\Delta Z$  ( $\Delta Z = Z(t_2) - Z(t_1)$ ) und die Flussrate der Änderungsrate  $\Delta Z/\Delta t$ . Den obigen Gleichungen entsprechend gelten folgende Zusammenhänge:

$$Z(t_2) = Z(t_1) + F(t_1, t_2)$$

und

$$Z(t_2) = Z(t_1) + \frac{F(t_1, t_2)}{\Delta t} \cdot \Delta t = Z(t_1) + \left( \frac{F_{IN}(t_1, t_2) - F_{OUT}(t_1, t_2)}{t_2 - t_1} \right) \cdot (t_2 - t_1).$$

Flüsse und Flussraten sind Systemgrößen. Flüsse sind absolute Änderungen von Zustandsgrößen. Flussraten hingegen sind relative Änderungen von Zustandsgrößen pro Zeiteinheit. Bezogen auf ein bestimmtes Zeitintervall  $(t_1, t_2)$ , entspricht die Flussrate dem Quotienten aus Fluss  $F$  und Zeitintervall:

$$\frac{F(t_1, t_2)}{t_2 - t_1}.$$

Dieser Zusammenhang zwischen Fluss und Flussrate gilt jedoch nur dann, wenn der Wert der Flussrate im betrachteten Zeitintervall konstant ist. Betrachtet man den Wert der Flussrate als zeitlich variable, so ist der Fluss als Integral der Flussrate über das Zeitintervall definiert:

$$F(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{F(t_1, t_2)}{t_2 - t_1} dt.$$

## 2.2 Systemkategorien

### Einfach – komplex

Die Einfachheit bzw. Komplexität eines Systems ist bestimmt durch die Anzahl und Verschiedenartigkeit der Elemente sowie die Menge und Dichte der Beziehungen zwischen den Elementen. Die Komplexität steigt mit dem Grad der Vernetzung. In diesem Sinne besitzen das System Erde und seine Teilsysteme einen hohen Grad an Komplexität (Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).

### Abgeschlossen – geschlossen – offen

Abgeschlossene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt weder Energie noch Stoffe aus und können daher nur theoretisch postuliert werden. Reale Systeme sind geschlossen oder offen. Geschlossene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt nur Energie aus, also keine Stoffe. Offene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt sowohl Energie als auch Stoffe aus. Das System Erde und seine Teilsysteme sind immer offen (Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).

### Statisch – dynamisch

Statische und dynamische Systeme unterscheiden sich in Bezug auf ihr zeitliches Verhalten. Dynamische Systeme unterliegen einer dauernden Wandlung, wodurch jedoch ein bestimmter Systemzustand aufrechterhalten werden kann. Es existiert dann ein dynamisches

Gleichgewicht oder Fließgleichgewicht. Dieses bleibt auf Grund von Regelmechanismen trotz fortwährendem Wechsel von Energie-, Stoff- und Informationsflüssen erhalten. Dynamik gehört zur Zustandsbeschreibung offener Systeme. Der Gleichgewichtszustand ist durch minimale Entropieänderung gekennzeichnet. Er darf nicht mit dem thermodynamischen Gleichgewicht verwechselt werden, bei dem sich die Entropie im Maximum befindet. Das System Erde und seine Teilsysteme sind, wenn auch auf unterschiedlichen Zeitskalen, immer dynamisch (Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).

### **Deterministisch – stochastisch**

Nach dem Grad der Vorbestimmtheit ihres Verhaltens wird zwischen deterministischen und indeterministischen (stochastischen) Systemen unterschieden. Deterministische Systeme verhalten sich in vorbestimmter Weise. Ihre Entwicklung ist klar und eindeutig vorhersehbar. Das Verhalten stochastischer Systeme unterliegt dem Zufall. Ihre Entwicklung kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden (Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).

### **Stabil – instabil**

Stabilität und Instabilität sind Unterscheidungskriterien, die die Veränderungsmöglichkeiten eines Systems charakterisieren. Ein System ist stabil, wenn es Umweltereignisse in einem gewissen Umfang abpuffern bzw. kompensieren kann. Stabile Systeme können auf Störungen reagieren und mit Hilfe von Regulationsmechanismen wieder in den Ausgangszustand zurückkehren. Stabile Systeme stagnieren also nicht, sondern befinden sich in permanenter Veränderung. Bei Instabilität gelingt dies nicht. Das System verlässt in diesem Fall seinen Gleichgewichtszustand, verändert sich oder wird zerstört (Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).

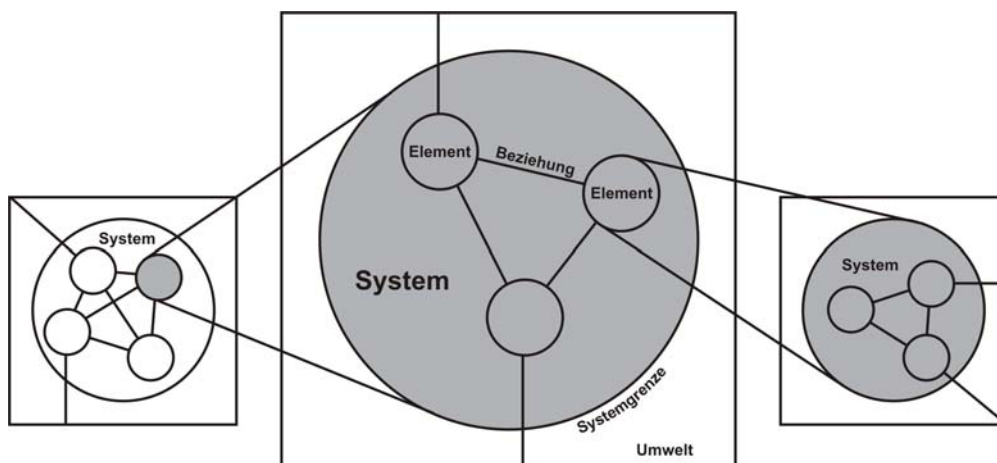
## **2.3 Systemeigenschaften**

Ein System zeichnet sich durch Eigenschaften aus, die nicht mit den Eigenschaften der Systemelemente, sondern allein mit einer spezifischen Prozessdynamik zu erklären sind. Die gilt insbesondere für das System Erde und seine Teilsysteme. Unabhängig von der konkreten Situation können Systeme durch Nichtlinearität und Irreversibilität der Prozesse, Systemhierarchisierung und die Fähigkeit zur Selbstorganisation gekennzeichnet sein. Selbstorganisation umfasst irreversible Prozesse in nichtlinearen, dynamischen Systemen, die durch das kooperative Wirken der Elemente zu komplexen Strukturen führen. Diese werden nicht von außen organisiert, sondern sind das Resultat innerer Wechselwirkungen.

Die zeitlichen und räumlichen Strukturen eines selbstorganisierten Systems werden ausschließlich von der internen Dynamik des Systems hervorgebracht. Dauerhafte Strukturen bzw. stationäre Zustände können dabei aus thermodynamischen Gründen nur in Systemen auftreten, die offen sind und sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befinden (siehe Kapitel 2.2 auf Seite 45 f.).

## 2.4 Systemhierarchie

Ein System kann mit anderen Elementen oder Systemen zusammen ein umfassenderes System bilden. Es wird dann als Teilsystem aufgefasst. Elemente eines Systems können selbst ein System darstellen. Sie werden dann ebenfalls als Teilsysteme aufgefasst. Die beschriebenen Phänomene sind in Abb. 3 dargestellt. Die hierarchische Struktur von Systemen ist für die Systemdynamik von Bedeutung. Makroskopische Eigenschaften eines Systems können auf Wechselbeziehungen zwischen Elementen der Mikroebene basieren. Zudem können Veränderungen auf Mikroebene die makroskopischen Eigenschaften unverändert lassen. Störungen, die nur einzelne Elemente oder Teilsysteme betreffen, können zum Beispiel vom Gesamtsystem abgepuffert werden, d. h. auf Grund ihres Auftretens ändert sich der Zustand des Gesamtsystems nicht (vgl. Blumenstein, Schachtzabel, Barsch et al., 2000).



**Abb. 3:** Systemhierarchie. Linke Seite: Ein System kann mit anderen Elementen oder Systemen zusammen ein umfassenderes System bilden. Es wird dann als Teilsystem aufgefasst. Rechte Seite: Elemente eines Systems können selbst ein System (Teilsystem) darstellen.

## 2.5 Systemanalyse

Die Systemanalyse hat die Aufgabe, die Struktur und die Dynamik von Systemen zu erfassen und zu interpretieren. Systemstruktur bezeichnet die Gesamtheit aller Systemelemente einschließlich Zustandsgrößen sowie die Beziehungen der Elemente. Dynamik bedeutet die Summe aller Systemprozesse. Unter einem Prozess versteht man dabei die zeitliche Aufeinanderfolge von verschiedenen Systemzuständen, d. h. von Systemstrukturen zu bestimmten unterschiedlichen Zeitpunkten. Letztlich dient die Systemanalyse der Aufklärung allgemeiner Ordnungsprinzipien bzw. Gesetze, auf denen die Funktionsweise eines Systems beruht.

Folgende inhaltlichen Schwerpunkte sind bei der Systemanalyse von Interesse:

- Abgrenzung des Systems von der Systemumwelt,
- Identifizierung (relevanter) Systemelemente,
- Identifizierung (relevanter) Beziehungen (Wirkungen und Flüsse) zwischen den Elementen,
- Identifizierung charakteristischer Systemeigenschaften, nämlich
  - Identifizierung der Struktureigenschaften (z. B.: Zustandsgrößen, Systemhierarchie) und
  - Identifizierung der Prozesseigenschaften, bzw. der Dynamik (z. B.: Flussraten).

## 2.6 Modellbildung

Bei der Systemanalyse wird vom Systembetrachter ein Modell konstruiert. Dieses bildet eine Auswahl von Elementen und Beziehungen des Systems ab. Ein Modell stellt eine Struktur- und Prozessanalogie eines Originals dar und ist daher eine idealisierte, abstrahierte, generalisierte oder vereinfachte Darstellung des Systems. Die Systemanalyse dient also dazu Struktur und Dynamik eines Systems handhabbar zu machen. Dabei liegt die Funktion eines Modells darin, die Struktur- und Prozesseigenschaften abzubilden und auf dieser Basis Verhaltensweisen des Systems aufzuklären. Mit Hilfe eines Modells lassen sich insofern auch hypothetische Aussagen über Struktur und Prozesseigenschaften eines real vorhandenen Systems machen, die einer unmittelbaren Erfahrung, zum Beispiel Messung, nicht oder noch nicht zugänglich sind. Modelle haben eine heuristische Funktion. Die Systemanalyse dient damit insbesondere der Erstellung von Prognosen über die zukünftige Entwicklung von Systemen.



## 2.7 Systemische Darstellungsformen

Systeme können auf verschiedenste Weise dargestellt werden. Die Darstellungen bzw. die Modelle von Systemen geben Beziehungsgefüge, d. h. Elemente und deren Beziehungen, wieder. Ossimitz (2002) ist der Auffassung, dass die Entwicklung systemischen Denkens mit dem Lernen entsprechender systemischer Darstellungsformen gleichzusetzen sei. Systemisches Denken werde nur durch adäquate systemische Darstellungsformen sichtbar.

Es werden von Ossimitz (2000a) vier grundlegende Formen der Systemdarstellung unterschieden, die diese Fähigkeit vermittelbar und empirisch messbar machen:

- verbale Beschreibungen;
- Wirkungsdiagramme;
- Flussdiagramme;
- Gleichungssysteme.

Jede dieser Darstellungsform stellt einen spezifischen Aspekt der Systemanalyse heraus. Die Wahl der geeignetsten Darstellungsform hängt von dem Ziel ab, das mit der Analyse eines Systems verfolgt wird. Nach Ossimitz (2000a) spielt die Systemmodellierung, bei der keine Software eingesetzt wird, sondern mit zunächst rein qualitativen Darstellungsformen gearbeitet wird, eine wichtige Rolle. Wirkungsdiagramme sind für Ossimitz (2000b) die wichtigste und flexibelste Möglichkeit zur qualitativen Darstellung von Systemen.

Graphische Repräsentationen spielen nicht nur bei der Vermittlung systemischen Denkens, sondern auch beim Erlernen komplexer Inhalte eine bedeutende Rolle. Stern, Aprea und Ebner (2003) haben gezeigt, dass Diagramme als mentale Werkzeuge dienen, um einen Lernstoff zu strukturieren und ein tieferes Verständnis zu ermöglichen. Dabei kommt der aktiven graphischen Konstruktion eine zentrale Rolle zu. Ein Diagramm zu zeichnen sei nicht nur hilfreich, um komplexe Informationen zu veranschaulichen, sondern könne auch die Struktur eines Problems enthüllen. Diagramme erleichtern den Transfer von Wissen auf neue Probleme in anderen Kontexten (Stern, Aprea & Ebner, 2003). Zudem rege die Nutzung von Diagrammen auch die metakognitiven Aktivitäten der Lernenden an, da sie über ihren Lernprozess nachdächten.

Eine wesentliche Rolle spielt somit die Konstruktion von Wirkungsdiagrammen und Flussdiagrammen. Diese Darstellungsformen sind in besonderer Weise geeignet, die spezifische Struktur komplexer Systeme wiederzugeben (Ossimitz, 2000a). Gleichungssysteme spiegeln demgegenüber eher die Prozesseigenschaften eines Systems wieder.

Auch Bell (2000) stellt die Bedeutung eigenständiger Konstruktion systemischer Darstellungsformen heraus: Selbst konstruierte graphische Darstellungen bildeten eine wesentliche Brücke zwischen prozesshaftem Zugang und nachfolgender Abstraktion und unterstützten die Bildung dynamischer Konzepte und die vertiefte Auseinandersetzung. Auf selbst erstellte Graphiken könne im weiteren Lernprozess besser zurückgegriffen werden. Die eigenständige Konstruktion ermögliche häufig das Ziehen weiterreichender Schlüsse.

Hagel hat 1985 im Rahmen seiner geographiedidaktischen Arbeiten den Vorteil eigenständiger Konstruktion von Wirkungs- und Flussdiagrammen bei der Vermittlung fachlicher Inhalte beschrieben. Sie erleichterten das Analysieren und Strukturieren von Zusammenhängen und ließen die Komplexität und Prozessdynamik besser erkennen. Zudem unterstützten sie eine vertiefte Auseinandersetzung der Schülerinnen und Schüler mit dem Lerninhalt. Hagel unterscheidet, im Gegensatz zu Ossimitz, drei Darstellungsarten von Systemen: Ablauf- und Flussdiagramme, Strukturmodelle und Wirkungsschemata.

- Ablaufdiagramme stellen Ereignisabläufe dar. Die Linien oder Pfeile zwischen Systemelementen deuten den Ablauf in der Zeit an. Sie stehen nicht für Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Ein Beispiel für ein Ablaufdiagramm ist die Darstellung des Entwicklungszyklus eines Organismus. Flussdiagramme sind Darstellungen von Stoff- oder Energieflüssen. In ihnen zeigen die Pfeile an, in welcher Richtung der Stoff- oder Energieumsatz erfolgt. Beispiele sind Darstellungen von Nahrungsnetzen oder Stofftransporten.
- Strukturmodelle stellen Hierarchien, Beziehungen oder Wirkungen dar, wobei keine zeitliche Abfolge berücksichtigt wird. Es handelt sich um Modelle von Systemzuständen oder Gleichgewichten. Die Pfeile stehen für „ist Teil von“, „wirkt auf“ oder „beeinflusst“. Sie sind keine Symbole für Ursache-Wirkungs-Beziehungen.
- Wirkungsschemata bilden das Beziehungsgefüge von Ursachen und Wirkungen sowie deren Folgen ab. Sie enthalten damit auch eine zeitliche Komponente. Die Pfeile haben die Bedeutungen „führt zu“, „hat zur Folge“, „wenn – dann“ oder „je mehr – desto mehr“. Eine scharfe Abgrenzung der drei Darstellungsarten von Systemen ist nicht möglich. Insbesondere Wirkungsdiagramme enthalten auf Grund ihrer zeitlichen Komponente immer auch Ablaufdiagramme. Durch die Abbildung der Elemente und ihrer Beziehungen können Wirkungsdiagramme auch Strukturdiagramme sein.

Hagel (1985) weist abschließend darauf hin, dass komplexe Systeme nicht allein mit Hilfe der beschriebenen Darstellungsformen abgebildet werden sollten. Der Unterricht bedürfe der Ergänzung durch andere Hilfsmittel, wie Lichtbilder, Filme, Karten, Experimente oder eigene Erhebungen, um möglichst viele „Eingangskanäle“ anzusprechen.

Fuchs (1995) formuliert eine weitere Form der Ausbildung systemischen Denkens. Es werden drei zentrale Aspekte genannt:

- Erfassung statischer Strukturen;
- Erfassen dynamischer Strukturen;
- Wissen über Indikatoren eines Systems, Erkennen von Störfaktoren.

Fuchs verbindet diese Aspekte jedoch nicht mit stufenspezifischen systemischen Darstellungsformen wie bei Ossimitz (2000a) oder Hagel (1985).

Neben den angeführten Darstellungsformen existieren noch weitere. Von diesen sollen nur szenische Darstellungen erwähnt werden. Sie bilden ein Systemmodell, in dem sie ein zu analysierendes Objekt bildhaft darstellen. Vor allem jüngere Lernende nutzen diese Darstellungsform (Sommer, 2005). Im Folgenden werden die vier systemischen Darstellungsformen beschrieben, die Ossimitz (2000a) formuliert hat. Sie spielen für empirische Untersuchungen zum systemischen Denken in der Biologiedidaktik eine entscheidende Rolle,

### **2.7.1 Verbale Beschreibungen**

Verbale Beschreibungen sind die offenste und am wenigsten formalisierte Darstellungsform. Nach Ossimitz (2002) vollzieht sich die Modellbildung in der Beschreibung eines Systems in der Umgangssprache. Ein Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass sich in der Konstruktion eines Systemmodells der langwierige Prozess der Erfassung komplexer Inhalte widerspiegelt. Die Auswahl von Elementen und Beziehungen sowie Aussagen über Struktur und Dynamik des Systems können diskutiert, einer Gültigkeitsprüfung unterzogen und umformuliert werden. Daher stellen verbale Beschreibungen häufig den ersten Schritt der Systemanalyse dar. Arbeiten mehrere Menschen zusammen, dient diese Darstellungsform der Zusammenführung verschiedensten Systemwissens.

Ein Nachteil der Darstellungsform ist ihre Struktur. „Klassische“ Fließtexte, wie zum Beispiel in Büchern, sind zumeist sequentiell, als lineare Abfolge von Worten bzw. Sätzen strukturiert. Demgegenüber besitzen Systeme vor allem netzwerkartige Strukturen. Systemische Zusammenhänge lassen sich jedoch nicht so ohne weiteres in eine lineare Sequenz überführen. Ein gleichzeitiges Auftreten verschiedener Prozesse kann in einem Text nur zeitlich nacheinander angeführt werden (siehe Kapitel 5.3 zum Thema Hypertext auf Seite 79 f.).

## 2.7.2 Wirkungsdiagramme

Wirkungsdiagramme sind Darstellungen, die ein kausales Beziehungsgefüge eines Systems wiedergeben. Sie bilden die Zusammenhänge von Ursachen, Wirkungen und deren Folgen ab. Die kausalen Beziehungen bzw. Wirkungsbeziehungen zwischen Systemelementen werden durch Pfeile dargestellt. Die Pfeile verlaufen in der Richtung der Wirkung. Im ersten Schritt haben die Pfeile die Bedeutung „wirkt auf“. Auf dieser Stufe werden Wirkungsbeziehungen rein qualitativ dargestellt. Im zweiten Schritt werden Systemelementen spezielle Systemgrößen, so genannte Zustandsgrößen, zugeordnet. Sie dienen dazu Aussagen, über den Zustand des Systems zu treffen.

Die Korrelationen zwischen zwei Systemgrößen können positiv oder negativ sein (siehe Abb. 4 auf Seite 52). Positive Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem „+“ versehen sind. Sie stehen für „je mehr ... umso mehr ...“ und „je weniger ... umso weniger ...“. Sie werden daher auch als gleichsinnige Korrelationen bezeichnet. Negative Korrelationen werden durch Pfeile dargestellt, die mit einem „-“ versehen sind. Sie stehen für „je mehr ... umso weniger ...“ und „je weniger ... umso mehr ...“. Sie werden daher auch als gegensinnige Korrelationen bezeichnet. Auf dieser Stufe werden Wirkungsbeziehungen nicht mehr nur qualitativ, sondern auch quantitativ dargestellt.

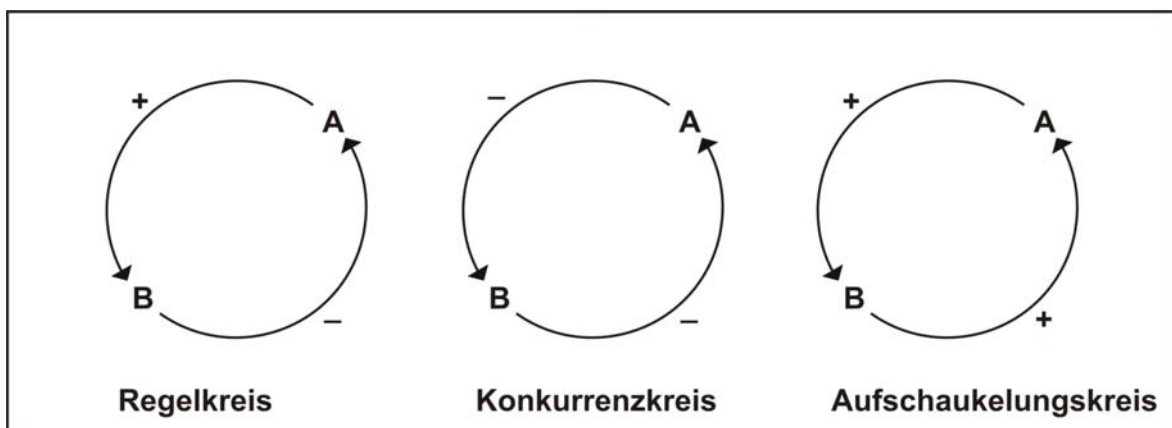


Abb. 4: Wirkungsdiagramme (Bayrhuber, H. & Schaefer, G., 1980).

Man betrachte die Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Sie repräsentieren die Kopplung von zwei Elementen des Systems *Erde*. Die Atmosphäre *wirkt auf* die Hydrosphäre und umgekehrt. Den Elementen können Systemgrößen zugeordnet werden, der Atmosphäre zum Beispiel die Größe *Temperatur* und der Hydrosphäre die Größe *CO<sub>2</sub>-Gehalt*. Die Temperatur der Luft wirkt auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt des Wassers. Die Temperatur der Luft korreliert negativ mit dem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Wassers. Je höher die Temperatur der Luft ist, umso niedriger ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Wassers. Innerhalb eines

Wirkungsdiagramms können verschiedene Typen von Kreisprozessen auftreten. Sie spiegeln das Zusammenspiel verschiedener Korrelationen zwischen Systemgrößen wieder.

Das Prinzip des Regelkreises wird häufig auch als negative Rückkopplung bezeichnet. Positive Rückkopplungen können sowohl das Prinzip des Konkurrenzkreises als auch das Prinzip des Aufschaukelungskreises repräsentieren.

### **2.7.3 Flussdiagramme**

Flussdiagramme sind Darstellungen, die ein stoffliches, energetisches oder informatives Beziehungsgefüge eines Systems wiedergeben. Die stofflichen, energetischen oder informativen Beziehungen bzw. Stoff-, Energie- oder Informationsflüsse zwischen Systemelementen werden durch Pfeile dargestellt. Die Pfeile geben an, in welche Richtung die Flüsse erfolgen.

Im ersten Schritt haben die Pfeile die Bedeutung „fließt in Richtung ...“. Auf dieser Ebene werden Flüsse rein qualitativ dargestellt. Im zweiten Schritt werden Systemelementen spezielle Systemgrößen, so genannte Zustandsgrößen, zugeordnet. Sie dienen dazu, Aussagen über den Zustand des Systems zu treffen. Auf dieser Ebene enthalten Flussdiagramme quantitative Modellelemente. Es werden Zustandsgrößen, Flüsse und Flussraten unterschieden (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 42 ff.). Innerhalb eines Flussdiagramms können Kreisläufe auftreten. Für die Darstellung biogeochemischer Stoffkreisläufe, wie etwa dem globalen Kohlenstoffkreislauf, sind Stoffflussdiagramme von besonderer Bedeutung (vgl. Kapitel 1.1 auf Seite 19 ff.).

### **2.7.4 Gleichungssysteme**

Systeme können auch mit Hilfe mathematischer Gleichungen dargestellt werden. Diese Darstellungsform ist die strengste. Sie basiert auf Notationsregeln der mathematischen Fachsprache. Häufig ist diese Darstellungsform an spezielle Computerprogramme (Simulationsprogramme) gebunden. Die Konstruktion eines Systemmodells muss sich daher auch an die spezifischen Eigenschaften der betreffenden Software richten. Gleichungssysteme spiegeln insbesondere die Prozesseigenschaften eines Systems wieder. Sie machen eine Quantifizierung der Systemgrößen notwendig.

### 3 Systemisches Denken

Zum Konzept *Systemisches Denken* finden sich in der Literatur verschiedenste Ansätze und Begrifflichkeiten. Die Vielzahl der Ausdrücke, wie zum Beispiel „Systemdenken“, „systemorientiertes Denken“, „systems thinking“, „vernetztes Denken“ und „komplexes Problemlösen“, macht deutlich, dass die Forschung zum Umgang mit Systemen unterschiedlichen Fachwissenschaften zuzuordnen ist. Die jeweilige Disziplin zeichnet sich durch ein spezifisches Verständnis bezüglich des systemischen Denkens aus.

Ansätze, wie systemisches Denken vermittelt werden kann, sind nicht sehr zahlreich. Unter dem Schlagwort *Komplexes Problemlösen* wird in der Kognitionspsychologie seit ca. 20 Jahren das Verhalten von Versuchspersonen in computersimulierten Szenarien untersucht. Die Benutzer von Computer-Simulationsprogrammen variieren die Parameter des zu steuernden Systems. Der Einsatz von diesen Programmen, mit dem vor allem der Psychologe Dietrich Dörner verbunden wird, erlaubt Rückschlüsse auf nicht vorhandene Fähigkeiten der Versuchspersonen im systemischen Denken (Dörner, 2000). Auf Fragen des Erwerbs komplexer Problemlösekompetenzen geht diese Forschungsrichtung nur am Rande ein.

Neben dem Bereich des *Komplexen Problemlösens* existieren *Systemdynamische Ansätze*. Diese verwenden Software, die zur quantitativen Modellierung von systemdynamischen Zusammenhängen geeignet ist, um die Entwicklung der Fähigkeit, systemisch zu denken, bei Schülerinnen und Schülern zu erfassen. Es steht also nicht die Steuerung eines Systems sondern die Modellkonstruktion im Vordergrund. Die Schülerinnen und Schüler modellieren und simulieren dynamische Systeme auf der Grundlage von Informationsmaterial. Die systemdynamisch orientierten Modellbildungsprogramme, die dafür eingesetzt werden, besitzen einen graphischen Eingabeeditor, mit dem die Modelle durch Verbindung von Fluss- und Wirkungsdiagrammen entwickelt werden. Sowohl Simulationsprogramme als auch Modellbildungsprogramme haben den Vorteil, dass sie die Entwicklung von Systemen über große Zeiträume darstellen können. Auf diese Weise können zeitverzögerte und langsam ablaufende Prozesse, die die Dynamik eines komplexen Systems bestimmen, besser erkannt werden. Durch die aktive Steuerung bzw. Modellierung größerer Zeiträume unterstützen diese Programme vor allem die Ausbildung der Fähigkeit, systemgerecht zu handeln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die in der Schule einsetzbaren Simulations- und Modellbildungsprogramme das zu betrachtende komplexe System nicht in dem Maße abbilden, wie es vielleicht professionelle Programme tun<sup>26</sup>. Die Entwicklung anderer Aspekte der Systemanalyse kommt bei dem Umgang mit den beschriebenen Programmen jedoch zu

---

<sup>26</sup> Auch professionelle Programme, die in der Wissenschaft eingesetzt werden, sind nur auf der Grundlage ihrer Eingabevoraussetzungen aussagekräftig und bilden nicht exakt das reale zu betrachtende System wieder.

kurz. Wichtig ist auch, den systemischen Blick auf die Natur zu schärfen. Nicht nur während des Steuerns und Modellbildens von Systemen, sondern auch bei jeglicher Auseinandersetzung mit der Umwelt sollte die Fähigkeit der systemischen Betrachtung geschult werden.

Bestehende Untersuchungen von Ossimitz (1996) sowie von Klieme und Maichle (1991, 1994) haben ihren Schwerpunkt auf der Wirkung von Modellbildungsprogrammen gehabt. Untersuchungen, die nicht die Software, sondern den fachlichen Inhalt in den Vordergrund stellen, gibt es wenige.

In Kapitel 3.1 werden wesentliche Ansätze zum systemischen Denken beschrieben. In Kapitel 3.2 auf Seite 67 ff. werden ausgewählte empirische Untersuchungen zum systemischen Denken in der Didaktik dargestellt.

### **3.1 Ansätze zum Systemischen Denken**

#### **3.1.1 Qualitative Ansätze**

Ossimitz (2000a) fasst unter dem Ausdruck „Qualitative Ansätze“ den biokybernetischen Ansatz von Frederic Vester und systemorientierte Managementansätze wie zum Beispiel von Peter Gomez und Gilbert J. Probst sowie von Peter Senge zusammen.

#### **Frederic Vester**

Frederic Vester hat im deutschen Sprachraum die Ausdrücke „vernetztes Denken“ bzw. „systemisches Denken“ populär gemacht. Am Kontext „die biologische Welt, das System unserer Biosphäre“ (Vester, 1989) hat er dazu beigetragen, eine breite Öffentlichkeit für ein Systemverständnis zu sensibilisieren (Ossimitz, 2000a). Insbesondere seine Fernsehserie mit dem Titel „Denken-Lernen-Vergessen“, die von ihm organisierte Wanderausstellung „Unsere Welt – ein vernetztes System“<sup>27</sup> und das Umweltspiel „Ökolopoly“<sup>28</sup> haben dabei eine bedeutende Rolle gespielt. Mit dem „Sensitivitätsmodell Prof. Vester®“ hat Vester ein computerbasiertes Instrumentarium entwickelt, das der Erfassung, Analyse und Bewertung von komplexen Systemen dient. Insbesondere soll die Umsetzung „vernetzten Denkens“ bei der Lösung komplexer Probleme ermöglicht werden (Vester, 2006). Wirkungsbeziehungen, insbesondere positive und negative Rückkopplungen, sollen berücksichtig

---

<sup>27</sup> Die Ausstellung wurde von 1978 bis 1983 in fünfzig Städten präsentiert. Sie hatte insgesamt ca. 750.000 Besucher (Ossimitz, 2000a).

<sup>28</sup> Das Umweltspiel erschien 1983. Später entwickelte Vester das Spiel weiter zu einem interaktiven computersimulierten Szenario (Ossimitz, 2000a).

sichtigt werden. Dadurch ergebe sich ein Verständnis realer Zusammenhänge, dass von der üblichen linearen Betrachtung abweiche. Auf der Basis eines ganzheitlichen Systemverständnisses könne der Anwender nachhaltige und systemverträgliche Maßnahmen entwickeln (Vester, 2005).

Im Gegensatz zu quantitativen Modellierungen systemdynamischer Ansätze (siehe Kapitel 3.1.3 auf Seite 62 f.) werden beim Sensitivitätsmodell qualitative Einflussgrößen bestimmt und ihr Verhalten simuliert. Die Software wird in zahlreichen Projekten in Wirtschaft, Verwaltung und Forschung eingesetzt (Vester, 2006). Das Sensitivitätsmodell basiert auf biokybernetischen Kenntnissen über das Verhalten von Systemen und Vesters Arbeiten zum „vernetzten Denken“ (Vester, 2005). In den Publikationen Vesters findet sich jedoch keine Definition für „vernetztes Denken“ bzw. „systemisches Denken“. Ossimitz (2000a) schreibt dazu:

*„Bei einer genaueren Durchsicht der Werke gewinnt man allerdings den Eindruck, der Vester Begriffe wie „vernetztes Denken“ oder „systemisches Denken“ nur als Aufhänger verwendet. Im Text selbst kommen sie kaum vor. Insbesondere sucht man in den umfangreichen Publikationen Vesters vergeblich nach einer konzisen Definition oder wenigstens einer klärenden Diskussion dieses Begriffes. [...] Insgesamt bleibt der Eindruck, das Vester hauptsächlich plakative Schlagworte liefert, die weder kritisch hinterfragt werden noch so ohne weiteres praktisch umsetzbar sind.“*

In dem Buch „Neuland des Denkens“ (Vester, 1997) findet sich lediglich folgendes Zitat:

*„So haben wir [...] an führende Köpfe der Wirtschaft und Wissenschaft der USA einen ersten gezielten Appell zum Umschwenken auf ein systemisches Denken und Planen, das sich an den Gesetzen des Lebendigen orientiert, gerichtet.“*

Der Begriff „vernetzt“ tritt bei Vester in Verbindung mit zahlreichen Substantiven auf. Zudem verwendet er ähnliche Ausdrücke, wie zum Beispiel „ökologisches Denken“ und „kybernetisches Denken“, ohne diese zu definieren, aufeinander zu beziehen oder voneinander abzugrenzen (Maierhofer, 2001). Aufgrund der unzähligen Beispiele, die Vester anführt, entstehe jedoch ein eher intuitives Verständnis des Begriffes „vernetzt“.

Vester veranschaulicht anhand zahlreicher Beispiele die systemischen Prinzipien der Natur. Dabei stellt er das Erkennen der Strukturen biologischer Systeme und das Üben praktischer Systemsteuerung in den Vordergrund. Er formuliert acht biokybernetische Grundprinzipien (siehe Abb. 5 auf Seite 57). Diese stellen für Vester die Basis des systemischen Denkens dar.



### **Acht Prinzipien der Natur, die das Überleben garantieren**

- 1. Das Prinzip der negativen Rückkopplung**  
Das bedeutet Selbststeuerung durch Aufbau von Regelkreisen statt ungehemmte Selbstverstärkung oder – nach dem Umkippen – Selbstvernichtung. Negative Rückkopplung muss daher über positive Rückkopplung dominieren.
- 2. Das Prinzip der Unabhängigkeit von Wachstum**  
Die Funktion eines Systems muss auch in einer Gleichgewichtsphase gewährleistet, d. h. von quantitativem Wachstum unabhängig sein. Denn ein permanentes Wachstum ist für alle Systeme eine Illusion.
- 3. Das Prinzip der Unabhängigkeit vom Produkt**  
Überlebensfähige Systeme müssen funktions- und produktorientiert sein. Produkte kommen und gehen, Funktionen bleiben.
- 4. Das Jiu-Jitsu-Prinzip**  
Hier geht es um die Nutzung vorhandener, auch störender, Kräfte nach dem Prinzip der asiatischen Selbstverteidigung, statt ihrer Bekämpfung nach der Boxermethode mit teurer eigener Kraft.
- 5. Das Prinzip der Mehrfachnutzung**  
Es gilt für Produkte, Funktionen und Organisationsstrukturen. Es führt durch Verbundlösungen zu Multistabilität und bedeutet eine Absage an so genannte Hundertprozentlösungen.
- 6. Das Prinzip des Recycling**  
Es bedeutet die Nutzung von Kreisprozessen zur Abfall- und Wärmeverwertung. Das vermeidet sowohl Knappheit als auch Überschüsse.
- 7. Das Prinzip der Symbiose**  
Das heißt gegenseitige Nutzung von Verschiedenartigkeit durch Kopplung und Austausch. Das aber verlangt kleinräumigen Verbund. Monostrukturen können daher nicht von den Vorteilen der Symbiose profitieren.
- 8. Das Prinzip des biologischen Designs**  
Auch diese Regel lässt sich auf Produkte, Verfahren und Organisationsformen gleichermaßen anwenden. Es bedeutet Feedbackplanung mit der Umwelt, Vereinbarkeit und Resonanz mit biologischen Strukturen, insbesondere auch der des Menschen.

**Abb. 5:** Die systemischen Prinzipien der Natur von Frederic Vester (Vester, 1989).

Vester fordert die Orientierung an den diesen Grundgesetzen der Natur: Komplexe Wechselwirkungen könnten so berücksichtigt werden. Das Grundproblem bestehe im Denken linearer Ursache-Wirkungsketten. Dieses trage dazu bei, dass der Umgang mit komplexen Systemen, d. h. mit der Realität, nicht gelinge. In seinen Veröffentlichungen übt er Kritik an den bestehenden Bildungs- und Unterrichtsformen. In seinem Buch „Neuland des Denkens“ (1997) führt Vester anhand unterschiedlicher anschaulicher Beispiele Defizite traditioneller Lehr- und Lernmethoden auf. Aus diesen leitet er Forderungen an einen verbesserten Unterricht ab:

- Fähigkeiten statt Stofffülle: Vester fordert die Entwicklung von Denkfähigkeiten, die sich weniger auf den einzelnen Wissensstoff als auf den Umgang mit diesem Stoff konzentrierten. Neben der Vermittlung eines Wissensgerüsts finde dadurch eine Erziehung zu kritischem Denken, zur Synthese, zur Analyse, zum Erkennen von Analogien und tieferen Zusammenhängen statt. Er schreibt dazu (1997): „[...] müssen

wir auch im Lernprozess den Übergang von der Vermittlung eines statischen Wissensgebäudes zu einem dynamischen Wissen finden [...]“.

- Einheit von Körper und Geist: Vester fordert, Lernen nicht auf die abstrakte, verbale Verarbeitung des Wissensstoffes zu beschränken. Er schreibt dazu (1997): „Deshalb müssen wir, nachdem wir jene kognitiven Bereiche und ihre Logik so großartig entwickelt haben, auch die anderen, mehr unbewussten Gehirnpartien der Mustererkennung, der bildhaften und analog arbeitenden Bereiche, der emotionalen und intuitiven Vorgänge und damit den Gesamtorganismus wieder in unser Denken und Handeln einbeziehen“.
- Vernetztes Lernen braucht Realität: „Statt nur mit Begriffen, mit Symbolen von Dingen, sollten wir beim Lernvorgang auch mit den Dingen selbst arbeiten, mit ihren Wechselwirkungen, mit ihren Beziehungen zur Umwelt.“ (Vester, 1997).

Die von Vester aufgestellten Forderungen werden dem komplexen Sachverhalt nur im Ansatz gerecht. Konkrete Hinweise zur Vermittlung vernetzten bzw. systemischen Denkens im Unterricht lassen sich nicht ableiten.

### **Peter Gomez und Gilbert J. Probst**

Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts haben Peter Gomez und Gilbert J. Probst Denkfehler, die beim Problemlösen in komplexen Situationen im Managementbereich auftreten können, formuliert. Es genüge zum Beispiel nicht die „Fotographie“ eines Ist-Zustandes, um eine Situation zu verstehen. Zudem könne mit der Einführung einer Lösung das Problem nicht ad acta gelegt werden (Gomez & Probst, 1987). Beide haben eine Methodik zur Modellierung und Auswertung systemischer Zusammenhänge und Vernetzungen entwickelt. Dabei haben sie auf den Einsatz computerbasierter Simulationen verzichtet. Zentrale Bedeutung bei der Analyse von Systemen hätten Wirkungsdiagramme. Diese Darstellungsform gebe ein kausales Beziehungsgefüge eines Systems wieder. Ein Wirkungsdiagramm setzt sich zusammen aus Systemelementen und Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen. Eine genaue Beschreibung dieser Darstellungsform ist in Kapitel 2.7.2 auf Seite 52 f. aufgeführt.

Auf die Identifizierung der Systemelemente und ihrer Vernetzung folgt bei Gomez und Probst die Erfassung der Dynamik sowie die Erarbeitung, Beurteilung und Umsetzung von Gestaltungs- und Lenkungskonzepten. Dazu werden die Wirkungsbeziehungen zwischen den Systemelementen nach ihrer Stärke klassifiziert und codiert. Auf der Grundlage dieser numerischen Ermittlung von Maßzahlen definieren die Autoren verschiedene Größen. Die-

se werden tabellarisch zusammengefasst<sup>29</sup>. Sie dienen der Interpretation von Verhaltensmöglichkeiten eines Systems und sind damit Grundlage systemorientierten Handelns.

In dem Buch „Ganzheitliches Problemlösen“ (1997) formulieren Gomez und Probst fünf Schritte, die zur Lösung eines Problems und ihrer Umsetzung in die unternehmerische Praxis führen können (siehe Abb. 6 auf Seite 59). Die Autoren ordnen den fünf Problemlösungsschritten jeweils Konkretisierungen vernetzten Denkens zu. Die pragmatischen Ausführungen machen deutlich, dass die Autoren mit vernetztem Denken vor allem das Ziel systemgerechten Verhaltens verfolgen.

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. <b>Probleme entdecken und identifizieren</b><ul style="list-style-type: none"><li>- Unterschiedliche Standpunkte einnehmen</li><li>- Zweckbestimmung und Systemabgrenzung vornehmen</li><li>- Schlüsselfaktoren einnehmen</li></ul></li><li>2. <b>Zusammenhänge und Spannungsfelder der Problemsituation verstehen</b><ul style="list-style-type: none"><li>- Den zentralen Kreislauf identifizieren</li><li>- Das Netzwerk aufbauen</li><li>- Zeitliche Abhängigkeit und Intensität ermitteln</li></ul></li><li>3. <b>Gestaltungs- und Lenkungsmöglichkeiten erarbeiten</b><ul style="list-style-type: none"><li>- Verhaltensmuster der nicht lenkbaren Teile ermitteln</li><li>- Lenkungsoptionen identifizieren</li><li>- Indikatoren der Zielerreichung festlegen</li></ul></li><li>4. <b>Mögliche Problemlösungen beurteilen</b><ul style="list-style-type: none"><li>- Die Einhaltung der systemischen Lenkungsregeln sicherstellen</li><li>- Alternativen qualitativ beurteilen</li><li>- Mögliche Problemlösungen quantitativ bewerten</li></ul></li><li>5. <b>Problemlösungen umsetzen und verankern</b><ul style="list-style-type: none"><li>- Stufengerecht und multidimensional verankern</li><li>- Früherkennung und Fortschrittskontrolle sicherstellen</li><li>- Entwicklungsprozesse und -fähigkeiten erfassen</li></ul></li></ol> |
|---|

**Abb. 6:** Ganzheitliches Problemlösen: Fünf Problemlöseschritte und die jeweilige Konkretisierung von „Vernetzt Denken“ (Gomez & Probst, 1997).

Auf der Basis von Wirkungsdiagrammen entwickelten Gomez und Probst einen praxioorientierten Ansatz zum systemischen Denken. Ihre empirischen Studien führten Gomez und Probst in betriebswirtschaftlichen Kontexten durch. Ihre Ergebnisse können aber die Entwicklung schulunterrichtsrelevanter Konzepte unterstützen.

---

<sup>29</sup> Näheres zur Methode des Klassifizierens und Codierens von Wirkungsbeziehungen findet sich bei Ossimitz (2000a) und bei Gomez & Probst (1997).

## Peter Senge

Seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts hat Peter Senge entscheidend zur Weiterentwicklung systemischen Denkens im Management beigetragen (Ossimitz, 2000a). Den Grundgedanken des so genannten „Organizational Learning“ gibt Ossimitz (2000a) vereinfacht an: Es reiche nicht aus, wenn Manager systemisch denken; in gewisser Weise müsse ein Unternehmen als ganzes systemisch denken. „Organizational Learning“ ist heute ein bedeutender Aspekt in den Wirtschaftswissenschaften und in der Unternehmensberatung (Ossimitz, 2000a). In dem Buch „The Fifth Discipline“ (1990) formuliert Senge die These, dass eine lernende Organisation auf fünf Disziplinen basiert: (1) Personal Mastery; (2) Mental Models; (3) Building Shared Vision; (4) Team Learning; (5) System Thinking. Der Titel des Buches weist auf den zentralen Aspekt bei einer Konzernentwicklung hin. Senge schreibt dazu (1990):

*„It is vital that the five disciplines develop as an ensemble. This is challenging because it is much harder to integrate new tools than simply apply them separately. But the payoffs are immense. This is why systems thinking is the fifth discipline. It is the discipline that integrates the disciplines, fusing them to a coherent body of theory and practice. [...] Without a system orientation, there is no motivation to look at how the disciplines interrelate.“*

Die zentralen Aspekte der fünften Disziplin „System Thinking“ fasst Senge wie folgt zusammen:

*„The essence of the discipline of system thinking lies in a shift of mind:*

- *Seeing interrelationships rather than linear cause-effect chains;*
- *Seeing processes of change rather than snapshots.*

*The practice of system thinking starts with understanding a simple concept called „feedback“ than shows how actions can reinforce or counteract (balance) each other. It builds to learning to recognize types of structures that recur again and again“ (Senge, 1990).*

Senge formuliert elf systemische Prinzipien (siehe Abb. 7 auf Seite 61), die Entscheidungen einer lernenden Organisation beeinflussen sollten. Zentraler Aspekt systemischen Denkens ist für Senge das Erlernen systemischer Grundstrukturen, so genannter „system archetypes“. Systemarchetypen sind unter anderem „Limits to Growth“, „Escalation“, „Balancing Process with Delay“ und „Shifting the Burden“ (Ossimitz, 2000a). Die Beispiele zeigen, welche besondere Bedeutung Kreisprozesse, die durch negative und positive Rückkopplungen gekennzeichnet sind, bei Senge einnehmen.

Als graphische Darstellungsform verwendet Senge ausschließlich Wirkungsdiagramme (siehe Kap. 2.7.2 auf Seite 52 f.). Jeder Systemarchetyp zeichnet sich durch spezifische Wirkungsstrukturen und charakteristisches Verhalten aus. Die Archetypen dienen dem Erkennen allgemeiner Prinzipien und tragen somit zum systemgerechten Handeln bei (Senge, 1990).

1. Today's problems come from yesterday's „solutions“.
2. The harder you push, the harder the system pushes back.
3. Behavior grows better before it grows worse.
4. The easy way out usually leads back in.
5. The cure can be worse than the disease.
6. Faster is slower.
7. Cause and effect are not closely related in time and space.
8. Small changes can produce big results – but areas of highest leverage are often the least obvious.
9. You can have your cake and eat it too – but not at once.
10. Dividing an elephant in half does not produce two small elephants.
11. There is no blame.

**Abb. 7:** Systemische Prinzipien nach Peter Senge (Senge, 1990).

### 3.1.2 Komplexes Problemlösen

Der Ansatz *Komplexes Problemlösen* wird seit ca. 20 Jahren in der Kognitionspsychologie verfolgt und vor allem mit dem Psychologen Dietrich Dörner verbunden<sup>30</sup>. Zentraler Aspekt ist die Untersuchung des Verhaltens von Versuchspersonen in computersimulierten Szenarien. Aus der Art und Weise, wie Benutzer eines Computer-Simulationsprogramms Systemparameter variieren und somit ein System steuern, werden Aussagen über deren Fähigkeit, systemisch zu denken abgeleitet. Dabei basiert die Steuerung auf qualitativen Systemmodellen. Die zu variierenden Parameter stellen Elemente eines kausalen Wirkungsgefüges dar.

Das erste computersimulierte System war *Tanaland*. Dieses Simulationsprogramm umfasste 54 Parameter zur Steuerung einer fiktiven ostafrikanischen Steppenregion. Simuliert wurde die Entwicklung des Lebensraums und der Lebensgemeinschaften, d. h. der Ackerbau betreibenden Tupis und der Vieh züchtenden Moros. Die Versuchspersonen erhielten

---

<sup>30</sup> Weitere Arbeiten zum *Komplexen Problemlösen* stammen unter anderem von Putz-Osterloh (1983, 1987), Funke (1984), Funke (1985), Reither (1985), Kühle & Badke (1986), Strohschneider (1986), Strzalka & Strzalka (1986), Funke & Müller (1988), Hübner (1988), Putz-Osterloh et al. (1988) und Hussy (1991). Einen Überblick über den Forschungsstand findet sich bei Dörner (2000) und Funke (1995).

die Aufgabe, das System zu steuern, indem sie die vorgegebenen Parameter variieren. Ihnen gelang es jedoch nicht, einen stabilen Systemzustand über längere Zeit aufrecht zu erhalten. Dörner fasste die auftretenden Probleme wie folgt zusammen (2000, S. 32):

*„Die Parallelen zu realen Ereignissen waren offenkundig:*

- *Handeln ohne vorherige Situationsanalyse,*
- *Nichtberücksichtigung von Fern- und Nebenwirkungen,*
- *Nichtberücksichtigung der Ablaufgestalt von Prozessen,*
- *Methodismus: man glaubt, über die richtigen Maßnahmen zu verfügen, weil sich keine negativen Effekte zeigen,*
- *Flucht in die Projektmacherei,*
- *Entwicklung von zynischen Reaktionen.“*

Dörners bedeutendstes Computer-Simulationsprogramm war *Lohhausen*. Über einen simulierten Zeitraum von zehn Jahren steuerten Versuchspersonen in der Rolle als Bürgermeister eine Kleinstadt. Mehr als 2000 Parameter konnten variiert werden. Die Steuerungsleistungen der Versuchspersonen wurden analysiert. In seinem abschließenden Bericht relativiert Dörner generalisierte Denk- und Handlungsregeln, wie sie von den Autoren qualitativer Ansätze systemischen Denkens aufgestellt werden (Dörner, 2000, S. 306 ff.):

*„Es kommt, so glaube ich nicht darauf an, dass man irgendwelche exotischen ‚Denkfähigkeiten‘ schult. [...] Es kommt eigentlich nur auf eines an, nämlich auf die Förderung des ‚gesunden Menschenverstandes‘. [...] Ich hoffe, hinlänglich klargemacht zu haben, dass man das, was oftmals pauschal ‚vernetztes Denken‘ oder ‚systemisches Denken‘ genannt wird, nicht als eine Einheit, als eine bestimmte, isolierte Fähigkeit betrachten kann. Es ist ein Bündel von Fähigkeiten, und im Wesentlichen ist es die Fähigkeit, sein ganz normales Denken, seinen ‚gesunden Menschenverstand‘ auf die Umstände der jeweiligen Situation einzustellen.“*

Eine Charakterisierung des Konzepts *Systemisches Denken* sowie das Ziel, derartige Fähigkeiten beim Lernenden zu fördern, ist von Dörner nicht unterstützt worden.

### **3.1.3 Systemdynamische Ansätze**

Systemdynamische Ansätze basieren auf quantitativen Computer-Simulationsmodellen. Den zentralen Aspekt der simulierten Entwicklung eines Systems bilden Zustandsgrößen, die sich mit der Zeit durch Zu- und Abflüsse (Flussgrößen) verändern. In den 50er Jahren begann Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT), konjunkturelle Warenbestandsschwankungen des Konzerns General Electric mit Hilfe eines systemdynamischen

mischen Computer-Simulationsmodells zu analysieren. In den 70er Jahren folgte die Veröffentlichung von Simulationsergebnissen eines systemdynamischen Stadtentwicklungsmodells. 1971 veröffentlichte Forrester sein erstes Weltmodell *World Dynamics* (Forrester, 1991). Er formulierte sieben Charakteristika komplexer Systeme (Forrester 1969):

*„Complex systems have many important behavior characteristics that we must understand if we expect to design systems with better behaviour. Complex systems: (1) are counterintuitive; (2) are remarkably insensitive to changes in many system parameters; (3) stubbornly resist policy changes; (4) contain influential pressure points, often in unexpected places, from which forces will radiate to change system balance; (5) counteract and compensate for externally applied corrective efforts by reducing the corresponding internally generated action (the corrective program is largely absorbed in replacing lost internal action); (6) often react to a policy change in the long run opposite to how they react in the short run; (7) tend toward low performances.“*

Forrester beschrieb zahlreiche Probleme im Umgang mit komplexen Systemen. Ursachen und Wirkungen würden zum Beispiel zeitlich und räumlich sehr eng miteinander verbunden. Relativ kleine Veränderungen von Systemparametern könnten relativ großen Einfluss auf das Gesamtsystem haben. Zudem würden Neben-, Rück- und Fernwirkungen häufig nicht berücksichtigt.

Systemdynamische Modellierung ist für Forrester ein Problemlöseprozess. Motiviert durch ein unbefriedigendes Systemverhalten werde versucht, ein System zu charakterisieren. Ziel sei es, das System zu verstehen und Fehler zu beheben (Ossimitz, 2000a). Forrester formuliert sechs Stufen, in denen sich systemdynamische Modellierung vollzieht. Er betont die zeitliche Abfolge der sechs Stufen, wobei einzelne Abschnitte durchaus mehrmals durchlaufen werden könnten (1994, S. 4):

- Step 1: Describe the System,
- Step 2: Convert description to level and rate equations,
- Step 3: Simulate the model,
- Step 4: Design alternative policies and structures,
- Step 5: Educate and debate,
- Step 6: Implement changes in policies and structure.

Für Forrester sind quantitative Modelle von zentraler Bedeutung für die Analyse von Systemen. Qualitative Modelle in Form von Wirkungsdiagrammen hält er nur für sinnvoll, um im Anschluss an eine systemdynamische Simulation Struktur- und Prozesseigenschaften des untersuchten Systems zu verdeutlichen (Ossimitz, 2000a). In der Schule ist jedoch zu-

nächst die Einsicht in strukturelle und entwicklungsspezifische Zusammenhänge eines Systems wichtig (siehe Kapitel 2.7 auf Seite 49 ff. und Kapitel 3.1.4 auf Seite 65 f.).

Systemdynamische Simulationsmodelle basierten zunächst auf der Software DYNAMO. DYNAMO bediente sich einer sehr komplizierten Syntax, die mit einer umfangreichen Dateneingabeschulung verbunden war. 1987 veröffentlichte Barry Richmond STELLA<sup>31</sup> (Richmond, Peterson & Vescusco, 1987). Die Software erlaubte die Entwicklung von Systemdynamikmodellen, die auf graphischen Flussdiagrammen basierten. Aufgrund der einfachen Benutzeroberfläche konnten Untersuchungen zum systemischen Denken auf einen größeren Personenkreis ausgeweitet werden.

Das erste Schulprojekt STACI<sup>n32</sup> begann in den 80er Jahren an der Brattleboro Union High School in Vermont. In den Fächern Biologie, Chemie, Physik und Staatsbürgerkunde wurden systemdynamische Simulationsmodelle eingesetzt. Die Ergebnisse wurden dokumentiert und analysiert (Mandinach, 1989). In den USA entstanden zahlreiche Projekte mit dem Ziel, systemdynamische Unterrichtsmaterialien zu entwickeln und systemisches Denken in den Schulunterricht zu integrieren. Systemorientierter Unterricht sollte sich vom Kindergarten bis zur 12. Jahrgangsstufe erstrecken (siehe Forrester, 1992). Am MIT wurde das *System Dynamics in Education Project* (SEDP) initiiert. 1991 wurde die Materialiensammlung *Creative Learning Exchange* (CLE) angelegt.

1988 entwickelte Piet van Blokland von der Vrijen Universität Amsterdam die Software VUDYNAMO. Es handelte sich um eine Weiterentwicklung von DYNAMO. Die Syntax war im Vergleich zum Original bedienerfreundlicher. Es entstanden einige Unterrichtsmaterialien, die Ende der 80er Jahre in niederländischen Schulen eingesetzt wurden (Blokland & Kok, 1989). 1989 wurde in Österreich das Thema *Untersuchung vernetzter Systeme* in den Mathematiklehrplan der elften Jahrgangsstufe der Realgymnasien aufgenommen. Ziel war die Vermittlung systemischen Denkens. Eine bestimmte dynamische Simulationssoftware stand nicht im Mittelpunkt.

Seit Mitte der 80er Jahre gab es in Deutschland Softwareentwicklungen zur Integration dynamischer Simulationsmodelle in den Schulunterricht. Zu den ersten in Deutschland erstellten Programmen zählten ORGASYS, DYNAMOS und FLUMMY<sup>33</sup>. Die erste graphisch orientierte systemdynamische Modellbildungssoftware war MODUS, die im Auftrag des Landesinstituts für Schule und Weiterbildung in Soest von Werner Walser und Joachim Wedekind entwickelt worden ist (Walser & Wedekind 1991 und Walser, 1992). Ihr Einsatz im Schulunterricht wurde insbesondere von Eckhard Klieme und Ulla Maichle un-

---

<sup>31</sup> Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation.

<sup>32</sup> System Thinking And Curriculum Innovation.

<sup>33</sup> Eine Beschreibung dieser Modellbildungssoftware findet sich bei Ossimitz (1990).



tersucht (Klieme & Maichle, 1991 und Klieme & Maichle, 1994, siehe Kapitel 3.2 auf Seite 67 ff.). MODUS wurde sehr bald von der Software DYNASYS abgelöst<sup>34</sup> (Ossimitz, 2000a). Die von Walter Hupfeld entwickelte Software hatte strukturelle Ähnlichkeit mit STELLA. Neben der graphischen Orientierung war insbesondere die quantitative Systemsimulation von Bedeutung.

1993 wurde das fächerverbindende Thema *Simulation dynamischer Vorgänge* in den Lehrplan von Baden-Württemberg aufgenommen (Koller, 1993 und Koller, 1995).

### 3.1.4 Systemisches Denken nach Ossimitz

Ossimitz fasst, basierend auf qualitativen Ansätzen (siehe Kapitel 3.1.1 auf Seite 55 ff.), dem Ansatz *Komplexes Problemlösen* (siehe Kapitel 3.1.2 auf Seite 61 f.) und systemdynamischen Ansätzen (siehe Kapitel 3.1.3 auf Seite 62 ff.) vier Dimensionen systemischen Denkens zusammen (2000a, S. 52):

- Vernetztes Denken – Denken in Rückkopplungskreisen,
- Dynamisches Denken: Denken in Zeitabläufen,
- Denken in Modellen,
- Systemgerechtes Handeln.

Die vier Dimensionen sind nach Ossimitz nicht unabhängig voneinander zu verstehen: Zusammengefasst ergäben sie ein erweitertes Verständnis systemischen Denkens. Systemisches Denken werde somit nicht auf einen einzelnen Anwendungszusammenhang, wie etwa die Entwicklung von Wirkungsnetzen im Managementbereich, die Steuerung computersimulierter Szenarien oder systemdynamisches Modellieren, reduziert, sondern auf eine breitere Basis gestellt. Die vier Dimensionen böten auf Grund ihrer engen Verbindungen untereinander, für eine Operationalisierung systemischen Denkens lediglich eine Orientierung.

Nach Ossimitz können folgende Teilaspekte der Messung systemischen Denkens dienen (2000a, S. 129): (1) Identifikation relevanter Systemelemente; (2) Vernetzungen identifizieren und beurteilen können; (3) Erkennen von Systemgrundmustern (Archetypen); (4) qualitative Systemmodelle selbst erstellen und beurteilen können; (5) numerische Simulationsmodelle selbst entwickeln und untersuchen können; (6) zeitliche Dynamiken und Entwicklungsmöglichkeiten erkennen können; (7) Fähigkeit zur Steuerung von „black-box“-Simulationsmodellen (vgl. Kapitel 2.5 auf Seite 48 f.). Im Folgenden werden die von

---

<sup>34</sup> Kurze Zeit wurde auch die Software POWERSIM und VENSIM eingesetzt (Ossimitz, 2000a). Auch die Programme STELLA und MOEBIUS werden im Schulunterricht eingesetzt (Schecker, 2002).

Ossimitz formulierten vier Dimensionen systemischen Denkens näher beschrieben. Ossimitz betont, dass er mit der Einteilung nicht die Absicht verfolge, ein Messverfahren zu entwickeln, sondern den Zweck verfolge, verschiedene Aspekte systemischen Denkens zu einem mehrdimensionalen Begriff zu integrieren.

### **Vernetztes Denken – Denken in Rückkopplungskreisen**

Nach Ossimitz (2000a) umfasst vernetztes Denken mehr als ein Denken in einfachen Kausalzusammenhängen bzw. Ursache-Wirkungsbeziehungen. Nicht nur direkte, sondern auch indirekte Wirkungen seien zu erkennen und zu beurteilen. Dabei müsse man insbesondere Rückwirkungen auf die Ursache erfassen. Zudem seien ganze Netze von Wirkungsbeziehungen aufzubauen und zu verstehen. Ossimitz (2000a) weist darauf hin, dass das Lernen dieser Fähigkeiten vor allem mit dem Einsatz von Wirkungsdiagrammen verbunden sei. Das Wirkungsdiagramm sei die am meisten verbreitete systemische Darstellungsform. Es sei leistungsfähig und vielfältig einsetzbar. Zudem sei es leicht vermittelbar (siehe Kapitel 2.7 auf Seite 49 ff.).

### **Dynamisches Denken – Denken in Zeitabläufen**

Systeme zeichnen sich durch eine Eigendynamik, d. h. ein spezifisches zeitliches Verhalten aus. Insbesondere Zeitverzögerungen und Schwingungen spielen eine bedeutende Rolle bei der Systemanalyse und Systemsteuerung. Ossimitz fasst sechs zentrale Aspekte des Umgangs mit Zeitabläufen in Systemen unter der Überschrift *Dynamisches Denken* zusammen (2000a): (1) Erkennen und Berücksichtigen der Eigendynamik von Systemen; (2) die Fähigkeit, zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten zu identifizieren; (3) Erkennen der Bedeutung langfristiger Wirkungen; (4) Erkennen und Beurteilen von charakteristischen systemischen Zeitgestalten (Verzögerungen, periodische Schwingungen, verschiedene Arten von Wachstumstypen – linear, exponentiell, logistisch usw.); (5) ein Verständnis für das gleichzeitige Ablaufen mehrerer Vorgänge in einem komplexen System; (6) die Fähigkeiten, Zeitgestalten (z. B. periodische Schwankungen oder zeitliche Verzögerungen) adäquat darzustellen bzw. in Raumgestalten umzuwandeln.

Das Lernen dieser Fähigkeiten ist nach Ossimitz vor allem an den Einsatz systemdynamischer Simulationsmodelle gebunden, da diese im Vergleich zur Realität einen stark beschleunigten Zeitverlauf ermöglichen.

Die zeitliche Entwicklung eines Systems kann auch durch Rückkopplungen bestimmt sein, die zu eskalierendem Wachstum oder Schwingungen führen. Somit ist dynamisches Denken eng mit dem Denken in vernetzten Strukturen verbunden.

## **Denken in Modellen**

Nach Ossimitz (2000a) ist dynamisches Denken in vernetzten Strukturen ein Denken in Modellen. Für das systemische Denken sei dabei entscheidend, dass es sich um bewusst wahrgenommene Modelle handle. Zum Denken in Modellen gehöre insbesondere die Fähigkeit zur Modellbildung. Modelle müssten konstruiert, analysiert, verbessert und weiterentwickelt werden. Die Modellbildung und die Modellanalyse hänge dabei entscheidend von den verfügbaren Darstellungsformen ab. Der Einsatz von Wirkungsdiagrammen unterstütze vor allem qualitative, die Verwendung systemdynamischer Simulationsmodelle vor allem quantitative Systemanalysen.

Eine modellorientierte Sichtweise von Systemen hat für Ossimitz mehrere Konsequenzen (2000a): (1) Dieselbe Situation kann durch unterschiedliche Systemmodelle repräsentiert werden. In diesem Sinne gibt es dann verschiedene systemische Sichtweisen; (2) Kein einzelnes Systemmodell kann für sich einen absoluten Gültigkeits- bzw. Wahrheitsanspruch erheben. Verschiedene Modelle sind nicht „richtig“ oder „falsch“, sondern mehr oder weniger starke Vereinfachungen; (3) Die Entwicklung/Konstruktion von Systemmodellen wird wesentlich entlastet. Es ist möglich und zulässig, für dieselbe Situation alternative Systemmodelle zu entwickeln; (4) Man vermeidet die Gefahr der Überinterpretation systemischer Ergebnisse bzw. Einsichten. Diese gelten nur im Rahmen des jeweiligen Modells.

## **Systemgerechtes Handeln**

Unter systemgerechtem Handeln versteht Ossimitz (2000a) die Fähigkeit, Systeme zu steuern. Systemgerechtes Handeln sei der bedeutendste Aspekt systemischen Denkens. Es gehe dabei um eine bewusst reflektierte Kompetenz mit einem breiten Spektrum an Einsatzmöglichkeiten, inklusive einer gewissen Transferierbarkeit.

### **3.2 Empirische Untersuchungen zum systemischen Denken in der Didaktik**

Es existieren einige empirische Untersuchungen zum systemischen Denken im schulischen Kontext. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studien von Klieme und Maichle (1991, 1994, siehe Kapitel 3.2.1 auf Seite 68 f.), Ossimitz (1994, 1996, 2000a, 2001,) sowie Ossimitz et al. (2000, siehe Kapitel 3.2.2 auf Seite 69 ff.), Maierhofer (2001, siehe Kapitel 3.2.3 auf Seite 71 f.) und Steinberg (2001, siehe Kapitel 3.2.4 auf Seite 72) zusammengefasst.

### 3.2.1 Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I

Klieme und Maichle untersuchten den Einsatz des Modellbildungssystems MODUS im Auftrag des Bonner Instituts für Bildungsforschung. Die Pilotstudie (1991) diente der Erprobung der Unterrichtseinheiten in den Fächern Biologie, Chemie, Mathematik und Politik. Es nahmen etwa 200 Schülerinnen und Schüler teil. Auf dieser Basis wurde die Studie *Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I* (1994) entwickelt. Insgesamt nahmen 459 Schülerinnen und Schüler aus 21 Klassen Nordrhein-Westfalens am Unterricht teil. Für die Auswertung der Studie konnten jedoch nur 238 Schülerinnen und Schüler aus elf Klassen der neunten und zehnten Jahrgangsstufe berücksichtigt werden. Es wurden vier Leitziele des Unterrichts mit der dynamischen Simulationssoftware MODUS formuliert (Klieme & Maichle, 1994):

*„Die Schüler sollten...*

- *selbständig Modelle über reale Zusammenhänge bilden, diese Modelle durch Simulation auf Übereinstimmung mit den realen Gegebenheiten überprüfen und so die Bedeutung und die Grenzen der Modellbildung erkennen,*
- *lernen, in Systemen (systemisch) zu denken,*
- *im computergestützten Projektunterricht ihre Fähigkeit entfalten, entdeckend zu lernen, miteinander zu kooperieren und sich argumentativ auszutauschen,*
- *nicht zuletzt ihr Wissen und ihr Verständnis für Zusammenhänge im jeweiligen Fachgebiet erweitern (Fachwissen).“*

Die Fähigkeit des systemischen Denkens reduzieren die Autoren in ihrer Studie auf vier Teilaspekte. Den Schülerinnen und Schülern sollte bewusst werden, dass ein Sachverhalt stets aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden könne und dass er sich aus jedem Blickwinkel jeweils anders darstelle. Sie sollten ebenfalls erkennen, dass ein Ereignis normalerweise mehr als eine Auswirkung habe und dass ein Sachverhalt mehr als eine Ursache haben könne. Sie sollten nicht zuletzt lernen, Systemverhalten vorherzusagen bzw. zu erkennen, wann die Information zu einer solchen Vorhersage nicht ausreiche.

Für die Untersuchung des Einsatzes von MODUS wurden die Fächer Biologie und Politik ausgewählt. Die Unterrichtseinheit *Lebensgemeinschaft Wald* umfasste die vielfältigen Beziehungen im Ökosystem Wald sowie Auswirkungen menschlicher Eingriffe in das System. Das Thema *Wirtschaftskapitän* behandelte die Dynamik der Marktwirtschaft.

Obwohl die meisten Schülerinnen und Schüler die Simulationssoftware MODUS als sehr komplex ansahen, zeigten sie keine Schwierigkeiten im Umgang mit den zentralen Bedienungselementen. Lediglich komplexere Funktionen des Programms verwandten sie nicht. Die Schülerinnen und Schüler lernten, Wirkungszusammenhänge mit Vernetzungen und

Rückkopplungen zu erkennen und mit Veränderungsraten umzugehen. Zeitabhängig variierende Größen konnten sie jedoch auch nach dem Unterricht mit MODUS nur schwer verstehen. In Bezug auf die von den Autoren formulierten Teilaspekte des systemischen Denkens ergaben sich nur geringfügige Lernerfolge. Befriedigende Ergebnisse wurden bei der Förderung von Fachkenntnissen und Kooperationsfähigkeit erzielt (Klieme & Maichle, 1994, S. 78 f.).

### **3.2.2 Entwicklung vernetzten Denkens**

Die Ergebnisse der Studie von Klieme und Maichle (1994) veranlassten Ossimitz (2000a, S. 148) zu der Aussage, dass der rein qualitativen Systemmodellierung, wie zum Beispiel mit Hilfe von Wirkungsdiagrammen, eine größere Bedeutung im Schulunterricht zukommen müsse. Quantitative Simulationen könne man auch durch einfachere Tabellenkalkulationsprogramme ersetzen und systemdynamische Modellbildung mit einer einfacheren Simulationssoftware, wie zum Beispiel DYNASIS, die auf Flussdiagrammnotation basiert, durchführen.

Ossimitz begann seine Untersuchung zur Entwicklung systemischen Denkens bei Schülerinnen und Schülern mit der Pilotstudie *Simulationssoftware im Unterricht* (1994). An der Hauptstudie *Entwicklung vernetzten Denkens* (1996) nahmen sieben Schulklassen der zehnten bis 13. Jahrgangsstufe mit 122 Schülerinnen und Schülern teil. Im Rahmen der Mathematikdidaktik lagen der Studie unter anderem folgende Ziele bzw. Fragestellungen zugrunde (1996, S. 179 f.): (1) Wie kann man die Entwicklung systemischen Denkens bei Schülerinnen und Schülern praktisch messen? (2) Welche systemischen Denk- und Darstellungskompetenzen besitzen Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II in Abhängigkeit vom Alter, Geschlecht, der Mathematiknote und der Computervorerfahrung? (3) Inwieweit lässt sich quantitative systemdynamische Modellbildung und Simulation am Computer in „normalen“ Mathematikunterricht der Sekundarstufe II integrieren?

Bei der Unterrichtsgestaltung hatten die beteiligten Lehrer große Freiheiten. Die fachlichen Inhalte des Unterrichts konnten selbst bestimmt werden. Sie umfassten die Untersuchung wirtschaftlicher Systeme (z. B. Bevölkerungswachstums, Zinsmodelle), naturwissenschaftlicher Systeme (z. B. Thermostat-Modell, Klimamodelle) und sozialwissenschaftlicher Systeme (z. B. Verbreitung eines Gerüchts). Vorgegeben wurde der Einsatz der systemdynamischen Simulationssoftware POWERSIM. Zudem musste die Leistung der Schülerinnen und Schüler mit Hilfe von Vor- und Nachtest protokolliert werden. Die Tests beinhalteten jeweils einen Text, der eine fiktive Situation beschreibt. Im Vortest wurde das System *Viehzucht des afrikanischen Steppenstammes Hilus* und im Nachtest das System *Fischzucht der indonesischen Moris* eingesetzt. Die Schülerinnen und Schüler erhielten

die Aufgabe, im Text beschriebene Zusammenhänge in einer Skizze darzustellen. Zudem sollten sie, anhand von Multiple-Choice-Fragen, das Systemverhalten nach Eingriffen beurteilen. Die Systemdarstellungen wurden in Anlehnung an die Studie von Klieme und Maichle (1994) nach verschiedenen Typen unterschieden: Nacherzählungen, Szenenbilder, Stadienbilder, Baumdiagramme, lineare Wirkungsdiagramme, Wirkungsdiagramme, Netzdiagramme, Funktionsgraphen und sonstige Darstellungen. Zur Analyse der Darstellungen wurden die jeweiligen Vernetzungs- und Komplexitätsindizes bestimmt<sup>35</sup>.

Ossimitz (2000a) konnte zeigen, dass im Anschluss an das Lernen mit der systemdynamischen Simulationssoftware POWERSIM der Vernetzungs- und Komplexitätsgrad bei den Systemdarstellungen stieg. Während im Vortest nur 17 % der Schülerinnen und Schüler Netzdiagramme mit Rückkopplungen zeichneten, verwendeten im Nachtest 62 % diese Präsentationsform. Die Lernzuwächse korrelieren mit keiner der Variablen *Alter*, *Geschlecht*, *Mathematiknote* und *Computervorerfahrung*. Berücksichtigt man jedoch die Variable *Lehrer* ergeben sich bezüglich des Lernerfolgs hoch signifikante Unterschiede. „Der unterrichtende Lehrer ist bei weitem der wichtigste Faktor bei der Erklärung unterschiedlicher Lernerfolge.“ (Ossimitz, 2000a, S. 239) Die von Lehrerin und Lehrer getroffenen Entscheidungen bezüglich der Projektorientierung und der Intensität des Computereinsatzes seien dabei kein maßgeblicher Faktor gewesen. Insbesondere die konsequente Fokussierung auf systemische Zusammenhänge habe zu größeren Lernzuwächsen geführt. Als wesentlichen Erfolgsfaktor nennt Ossimitz (2000a, S. 241) den Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen. Ossimitz konnten zeigen, dass sich aufgrund eines kurzen Trainings mit Wirkungsdiagrammen die Fähigkeit systemisch zu Denken steigern lässt. Ossimitz schreibt:

*„Wir konnten feststellen, dass bereits das bloße Sehen von zwei einfachen Wirkungsdiagrammen Schüler dazu veranlasst, [...] ganz anders in eine Graphik umzusetzen als dies Schüler ohne einen solchen Hinweis tun“ (Ossimitz, 2000a, S.133).*

*„Diese Vorbereitung reichte aus, dass alle drei Schüler im Vortest [...] innerhalb von wenigen Minuten die verbal gegebene [...] Situation in Wirkungsdiagrammform darstellen“ (Ossimitz, 2000a, S.161).*

Die Frage nach dem Unterschied passiver Rezeption und aktiver Konstruktion systemischer Darstellungsformen wurde bei Ossimitz (2000a) nicht berücksichtigt.

---

<sup>35</sup> Genaue Definitionen für Vernetzungs- und Komplexitätsindex finden sich bei Ossimitz (2000a).

Im Gegensatz zu den qualitativen Systemdiagrammen konnte Ossimitz der quantitativen systemdynamischen Modellbildung und Simulation keine lernprozessfördernde Wirkung nachweisen. Der Einsatz habe sich hinsichtlich der Entwicklung systemischen Denkens weder als besonders hinderlich noch als übertrieben förderlich erwiesen.

Ossimitz untersuchte in einer weiteren Studie die Fähigkeit, zwischen Zustand- und Flussgrößen zu differenzieren (Ossimitz, 2001). Die Unterscheidung dieser Größen ist grundlegend für systemdynamische Modellbildungsprozesse. An der Studie nahmen 154 vor allem jüngere Studierende der Betriebswirtschaft teil. Die Versuchspersonen erhielten zwei Aufgaben, eine zur Unterscheidung der Staatsverschuldung und des Budgetdefizits und eine zum Ab- und Anreizeverhalten von Hotelgästen. Die Studentinnen und Studenten hatten große Schwierigkeiten, Zustands- und Flussgrößen zu unterscheiden. Zum Beispiel wurde das Maximum einer Flussgröße häufig als Maximum der zugehörigen Zustandsgröße angesehen. In einem Folgeprojekt (Ossimitz et al., 2000) konnte gezeigt werden, dass das Training systemischer Darstellungsformen die Leistungen der Versuchspersonen verbessert.

### **3.2.3 Förderung des systemischen Denkens durch computerunterstützten Biologieunterricht**

Maierhofer (2001) untersuchte die Förderung systemischen Denkens durch computerunterstützten Biologieunterricht. Dabei bezog sie sich auf die von Ossimitz formulierte Definition systemischen Denkens (siehe Kapitel 3.1.4 auf Seite 65 ff.). An der Studie nahmen 62 Schülerinnen und Schüler der zwölften Jahrgangsstufe teil. Die Leistungen der Versuchspersonen wurden mit Hilfe von Vor- und Nachtest erhoben. In der computergestützten Unterrichtseinheit zwischen den Tests lernten die Schülerinnen und Schüler das Ökosystem See kennen.

Die Tests beinhalteten jeweils einen Text, der fiktive Situationen beschreibt. Wie schon bei Ossimitz (1996) wurde im Vortest das System *Viehzucht des afrikanischen Steppenstammes Hilus* und im Nachtest das System *Fischzucht der indonesischen Moris* eingesetzt. Die Schülerinnen und Schüler erhielten jedoch die gezielte Aufgabe, im Text beschriebene Zusammenhänge mit Hilfe eines Wirkungsdiagramms darzustellen. Zudem enthielten die Tests offene Fragen und Multiple-Choice-Fragen. Zur Analyse der Wirkungsdiagramme bildete Maierhofer zwei Indizes, die *Anzahl verwendeter Systemgrößen aus der Menge wesentlicher Systemgrößen* und die *Güte der Relationen*.

Maierhofer konnte zeigen, dass Wirkungsdiagramme den Zugang zu komplexen, dynamischen Systemen ermöglichen. Wesentliche Systemgrößen würden vermehrt erkannt. Insbesondere vielfältige Wechselwirkungen könnten von den Versuchspersonen beschrieben werden. Nach Maierhofer konnte die Fähigkeit vernetzte Strukturen in Bezug auf das Sys-

temverhalten richtig zu beurteilen jedoch nicht gefördert werden. Maierhofer berücksichtigte, ebenso wie Ossimitz (2000a), nicht den Unterschied passiver Rezeption und aktiver Konstruktion systemischer Darstellungsformen.

### **3.2.4 Die Bedeutung graphischer Repräsentationen für den Umgang mit einem komplexen dynamischen Problem**

In der Studie *Die Bedeutung graphischer Repräsentationen für den Umgang mit einem komplexen dynamischen Problem* untersuchte Steinberg (2001) ein von ihr entwickeltes Training zur Förderung systemischen Denkens. An der Studie nahmen 71 Schülerinnen und Schüler im Alter von 13 bis 16 Jahren Das Trainingsprogramm umfasste die Vermittlung wichtiger systemtheoretischer Prinzipien und das Erlernen einer Systemanalyse anhand von Wirkungsdiagrammen. Es wurden drei Versuchsgruppen unterschieden. Eine Gruppe beschäftigte sich mit Aspekten der Systemtheorie und der Systemanalyse mit Wirkungsdiagrammen. Eine zweite Gruppe lernte systemtheoretische und systemanalytische Prinzipien ohne Wirkungsdiagrammeinsatz. Die dritte Gruppe diente als Vergleichsgruppe. Im Anschluss an das Training erhielten die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe, die Computersimulation *Hunger in Nordafrika* zu bearbeiten. Die Steuerung dieses komplexen dynamischen Problems diente der Operationalisierung von *Handeln in komplexen Systemen*. Zwischen den drei Gruppen konnten keine signifikanten Leistungsunterschiede ermittelt werden. Nach Steinberg haben vermutlich Vorerfahrungen mit Wirkungsdiagrammen und Vorwissen über systemtheoretische Prinzipien einen möglichen Effekt überlagert.



## 4 Systemkompetenz

Derzeit wird die Entwicklung des deutschen Bildungssystems von der Einführung der Bildungsstandards mit ihrer Überprüfung bestimmt. Bildungsstandards formulieren verbindliche Anforderungen an schulische Lehr- und Lernprozesse. Sie spielen eine zentrale Rolle innerhalb der Qualitätsentwicklung und Qualitätssicherung im Bildungsbereich. Insbesondere die Ergebnisse von TIMSS<sup>36</sup> und PISA<sup>37</sup> haben zu dieser grundlegenden Wende in der Bildungspolitik geführt. Das Bildungssystem soll künftig weniger am „Input“, wie zum Beispiel an Lehrplänen, als vielmehr am „Output“, also an den Lernergebnissen der Schülerinnen und Schüler auf inhaltlicher und Handlungsebene, orientiert sein. Bildungsstandards legen fachspezifisch fest, welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler bis zu einer bestimmten Jahrgangsstufe erwerben sollen.

In Kapitel 4.1 auf Seite 73 f. wird der allgemeine Kompetenzbegriff nach Weinert (2001) erläutert. In Kapitel 4.2 auf Seite 74 wird insbesondere auf die biologische Kompetenz *Denken in Systemen* eingegangen. In Kapitel 4.3 auf Seite 74 f. wird Systemkompetenz als zentrales Element einer Bildung für Nachhaltigkeit beschrieben.

### 4.1 Kompetenzen

Unter dem Begriff *Kompetenz* wird in der aktuellen Lehr-Lernforschung nicht nur die Fähigkeit verstanden, bestimmte Arten von Problemen zu lösen. Weinert geht darüber hinaus und definiert Kompetenz als

*„[...] die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können.“* (2001, S. 27 f.)

Kompetenz stellt somit die Verbindung zwischen Wissen und Können her (Klieme, 2004). Die individuelle Ausprägung einer Kompetenz wird nach Weinert (2001) von verschiedenen Aspekten bestimmt: Fähigkeit, Wissen, Verstehen, Können, Handeln, Erfahrung und Motivation. Die Entwicklung und Förderung von Kompetenzen muss daher ein großes Spektrum an Lernkontexten, Aufgabestellungen und Transfersituationen einschließen

---

<sup>36</sup> The Third International Mathematics and Science Study (siehe Baumert, Lehmann, Lehrke et al., 1997 und Baumert, Bos & Lehmann, 2000a, b).

<sup>37</sup> Programme for International Student Assessment (siehe OECD, 2003, Baumert, Klieme, Neubrand et al., 2001 und Baumert, Artelt, Klieme et al., 2002).

(Klieme, Bulmahn, Wolff et al., 2003). Kompetenzmodelle dienen dabei der Konkretisierung von Inhalten und Niveaustufen. Nach Klieme, Bulmahn, Wolff et al. (2003) sind Kompetenzen in hohem Maße domänenspezifisch. Fachbezogene Kompetenzen sind eine notwendige Grundlage fächerübergreifender Kompetenzen. Die Spezifität erlangen Kompetenzen jedoch erst durch den konkreten Inhalt, um den es im jeweiligen Problemlöseprozess geht. Daher ist zum Beispiel biologisches Wissen notwendig für die Ausbildung biologischer Kompetenzen (Mayer, Harms, Hammann, Bayrhuber & Kattmann, 2004).

## **4.2 Denken in Systemen – eine biologische Kompetenz**

Für das Fach Biologie wurden zehn Kompetenzen formuliert (Mayer, Harms, Hammann, Bayrhuber & Kattmann, 2004): (1) Konvergentes Denken, (2) Divergentes Denken, (3) Denken in Systemen, (4) Denken in mentalen Modellen, (5) Fächerüberschreitendes Denken, (6) Naturwissenschaftliches Argumentieren, (7) Verbalisierung eines Sachverhalts, (8) Bewerten, (9) Umgang mit Graphen und (10) Umgang mit quantitativen Größen. Im Folgenden soll die dritte Kompetenz skizziert werden.

*Denken in Systemen* umfasst Denkvorgänge, die über lineares Schlussfolgern hinausgehen. Es handelt sich um „vernetztes Denken“, das spezifische Systemelemente und ihre Beziehungen untereinander, wie zum Beispiel Rückkopplungen, berücksichtigt. Grundvoraussetzungen für die Bearbeitung biologischer Fragestellungen sind somit Kenntnisse über die Elemente biologischer Systeme und deren Relationen.

## **4.3 Systemkompetenz**

Systemkompetenz ist im Kompetenzmodell einer Bildung für Nachhaltigkeit von Rost, Lauströer und Raack (2003) eine von drei zentralen Kompetenzen<sup>38</sup>. Bildung für Nachhaltigkeit verstehen die Autoren als Konzept, dass sich wie folgt umschreiben lässt:

*„Bildung für nachhaltige Entwicklung soll Schülerinnen und Schüler befähigen und über die Bewertung von Umweltveränderungen motivieren, sich an einer gesellschaftlichen Entwicklung zu beteiligen, die die Lebensqualität der jetzt lebenden Menschen einander angleicht und die Entfaltungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen nicht einschränkt.“* (Rost, Lauströer & Raack, 2003, S. 10).

---

<sup>38</sup> Neben Systemkompetenz werden von Rost, Lauströer und Raack (2003) noch Gestaltungs- und Bewertungskompetenz berücksichtigt.

Schülerinnen und Schüler müssen globale Zusammenhänge erkennen und verstehen sowie Wertmaßstäbe entwickeln und anwenden können. Zudem müssen sie die Fähigkeit besitzen, in die Entwicklung komplexer Systeme einzugreifen und sie im Sinne von Nachhaltigkeit zu steuern (AG Rahmenplan des BLK-Programms „21“). Dabei zeichnet sich Wissen, das auf globale Entwicklungsprozesse ausgerichtet ist, vor allem durch einen hohen Komplexitätsgrad aus. Diesem wird man am ehesten durch systemorientierte Betrachtungsweise gerecht (Rost, Lauströer & Raack, 2003): Die Kompetenz, mit globalen Zusammenhängen umgehen zu können, müsse sich auf Wissen aus mehreren Fachdisziplinen stützen, d. h. interdisziplinäre Wissensstrukturen seien konstitutiv für das Konzept der Systemkompetenz. Zudem sei ein Verständnis von Systemkompetenz als beständige und flexible Eigenschaft sinnvoll, die die Lernenden auch zukünftig dazu befähige, mit komplexen Situationen umzugehen. Rost, Lauströer und Raack (2003) definieren Systemkompetenz als Fähigkeit und Bereitschaft,...

- einzelne Phänomene als einem größeren System zugehörig zu erkennen,
- Systemgrenzen und Teilsysteme sowohl zu erkennen als auch sinnvoll zu bilden,
- die Funktionsweise von Systemen zu verstehen und
- aufgrund der Kenntnis der Veränderung einzelner Systemkomponenten Vorhersagen über die weitere Entwicklung des Systems zu machen,
- sowie deren Umsetzung und Anwendung in verschiedenen Situationen und Kontexten.

Bezug nehmend auf den Kompetenzbegriff von Weinert (siehe Kapitel 4.1 auf Seite 73 f.), formulieren Rost, Lauströer und Raack (2003) folgende Aspekte der Systemkompetenz:

- Schülerinnen und Schüler sollen die *Fähigkeit* zum vernetzten und prozessualen Denken entwickeln.
- Zur Bewältigung von Problemsituationen sollen sie auf erworbenes *Wissen* über beteiligte Faktoren sowie deren Zusammenhang und Interaktion zurückgreifen können.
- Zusammenhänge und Wechselwirkungen in Systemen sollen *verstanden* werden.
- Die Lernenden sollen mit Systemen umgehen, diese steuern und sich selbst als Elemente von Systemen verhalten *können*.
- Sie sollen ihr *Handeln* so gestalten, dass eine Berücksichtigung systemischer Aspekte erkennbar ist.
- Dabei sollen sie auf bisher gesammelte *Erfahrungen* auch mit anderen zurückgreifen.
- Schließlich sollen sie auch eine genügende *Motivation* zeigen, mit Systemen umzugehen und als Teile von Systemen zu agieren.

## 5 *Cognitive-Flexibility*-Theorie

Die *Cognitive-Flexibility*-Theorie (CFT) steht vor allem für den Wissenserwerb bei fortgeschrittenen Lernenden. Sie bezieht sich auf das Lernen komplexer Inhalte. Dieses setzt, bezogen auf Denk- und Arbeitsweisen, Interdisziplinarität voraus. Das Konzept biogeochemischer Kreisläufe berücksichtigt neben systemtheoretischen Aspekten (siehe Kapitel 2 auf Seite 42 ff.) auch verschiedene naturwissenschaftliche Disziplinen (siehe Kapitel 1.1 auf Seite 19 ff.). Die *Cognitive-Flexibility*-Theorie kann somit die Entwicklung einer Lernumgebung für die Sekundarstufe II zum Thema *Der globale Kohlenstoffkreislauf* unterstützen.

In Kapitel 5.1 auf Seite 76 f. werden die zentralen Aspekte der *Cognitive-Flexibility*-Theorie vorgestellt. In Kapitel 5.2 auf Seite 78 ff. wird die Wirkung multiperspektivischen Lernens anhand ausgewählter Untersuchungen beschrieben. Abschließend wird die mit der *Cognitive-Flexibility*-Theorie verbundene Struktur von Lernmaterial thematisiert (siehe Kapitel 5.3 auf Seite 79 ff.).

### 5.1 *Cognitive-Flexibility*-Theorie – ein instruktorischer Ansatz für die Gestaltung konstruktivistischer Lernumgebungen

Die vorunterrichtlichen Vorstellungen unterscheiden sich häufig von wissenschaftlichen Vorstellungen, die im Unterricht vermittelt werden sollen. Erstere haben einen großen Einfluss auf die Interpretation des Lernmaterials, da der Lernende sein Wissen auf der Basis seines bereits bestehenden Wissens selbst konstruiert (Duit, 2000). Aus diesem Grunde sollten vorunterrichtlichen Vorstellungen bei der Planung von Unterricht berücksichtigt werden. Der Lernprozess, der zu der wissenschaftlichen Sichtweise führen soll, muss durch die Lernumgebung unterstützt werden, in die er eingebettet ist. Die *Cognitive-Flexibility*-Theorie (siehe Spiro, Vispoel, Schmitz et al., 1987, Spiro, Feltovich, Jacobson et al., 1989, Spiro, Feltovich, Jacobson et al., 1992, Spiro, Feltovich, Jacobson et al., 1995, Spiro & Jehng, 1990) ist ein instruktorischer Ansatz zur Förderung des Wissenserwerbs aus dem sich grundlegende Aspekte für die Gestaltung einer konstruktivistischen Lernumgebung ergeben (Gerstenmaier & Mandl, 1995).

Duit (2000) plädiert dafür, nicht allein oder vorwiegend Konzeptwechsel auf der Ebene naturwissenschaftlicher Inhalte zu betrachten, sondern sich multiplen Konzeptwechseln zuzuwenden, d. h. die Wechselwirkungen von Konzeptwechseln auf der Ebene der Inhalte mit solchen auf Meta-Ebenen (wie wissenschaftstheoretischen und metakognitiven Vor-

stellungen) zu erforschen. Konzeptwechsel auf Meta-Ebenen würden sogar Konzeptwechsel auf Inhaltsebene fördern. Die *Cognitive-Flexibility*-Theorie strebt an, ein Konzept

- in verschiedenen Kontexten,
- aus unterschiedlichen Perspektiven,
- zu verschiedenen Zeiten,
- unter veränderter Zielsetzung und
- mit anderen Konzepten in Verbindung gebracht

zu unterrichten.

Ziel dieser Instruktionen ist es, multiple Wissensrepräsentationen bei den Lernenden zu erreichen, die zu einer flexibleren Wissensanwendung führen sollen.

Eine Lernumgebung im Sinne der *Cognitive-Flexibility*-Theorie bietet den Lernenden verschiedene Kontexte an, um sicherzustellen, dass das zu lernende Konzept nicht auf einen Kontext fixiert bleibt, sondern flexibel auf andere Problemstellungen angewendet werden kann (Gerstenmaier & Mandl, 1995). Zu der Vermittlung eines Konzepts in veränderten Kontexten gehört auch die Herstellung von Verbindungen zwischen diesen Kontexten. Vorunterrichtliche Vorstellungen sind häufig tief verankert. Da sie sich im Alltag bewährt haben, ist der Widerstand gegenüber ihren Änderungen groß. Wird ein Konzept in verschiedenen Kontexten behandelt, haben die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, sich intensiver mit dieser neu zu erlernenden wissenschaftlichen Vorstellung auseinanderzusetzen. Je nach Kontext werden dem Lernenden andere Aspekte des Konzeptes deutlich. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass dem Lernenden Widersprüche zwischen seiner Vorstellung und der zu vermittelnden Vorstellung bewusst werden.

Die Lernumgebung im Sinne der *Cognitive-Flexibility*-Theorie ermöglicht dem Lernenden auch, dass zu vermittelnde wissenschaftliche Konzept aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. Ziel ist ebenfalls die Förderung einer flexiblen Anwendung des Wissens. Dem Lernenden soll deutlich werden, dass aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet ein zu lernendes Konzept auch unterschiedliche Bedeutungen haben kann. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Lernende mit seiner vorunterrichtlichen Vorstellung unzufrieden ist, wird erhöht und damit der Widerstand gegenüber eines Konzeptwechsels gesenkt.

Des Weiteren zeichnet sich eine Lernumgebung im Sinne der *Cognitive-Flexibility*-Theorie dadurch aus, dass der Lernende ein Konzept zu verschiedenen Zeiten und unter veränderter Zielsetzung bearbeitet. Schließlich soll das Konzept mit anderen Konzepten in Verbindung gebracht werden, damit seine Besonderheiten aber auch die Gemeinsamkeiten mit anderen Konzepten deutlich werden.

## 5.2 Untersuchungen zur Wirkung multiperspektivischen Lernens

Die von Spiro und Mitarbeitern entwickelte *Cognitive-Flexibility*-Theorie (CFT) steht vor allem für den Wissenserwerb bei fortgeschrittenen Lernenden. Die CFT bezieht sich auf das Lernen komplexer Inhalte sowie auf das Lernen in wenig strukturierten Gebieten. Die Autoren sprechen von „complex und ill-structured domains“. Als Beispiel wird häufig die Medizin angeführt. Die Geowissenschaften mit ihren vielfältigen Teildisziplinen zählen sicherlich auch dazu.

Ziel eines Unterrichts im Sinne der CFT ist es, multiple Repräsentationen zu induzieren, die flexibel in einer Vielzahl von Kontexten herangezogen werden können. Dabei wird angenommen, dass bei der Wissensnutzung das Vorwissen nicht lediglich als geschlossene Einheit abgerufen wird, sondern dass in der Problemsituation mit den multiplen Kontextrepräsentationen Wissen konstruiert wird, das zur Problemlösung geeignet ist.

Die instruktionalen Maßnahmen der CFT – *ein Konzept in verschiedenen Kontexten, zu unterschiedlichen Zeiten, aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und zu anderen Konzepten in Verbindung gebracht* zu unterrichten – sollen das Lernen komplexer Inhalte in wenig strukturierten Gebieten erleichtern. Dem Lernenden soll die Wissensanwendung dadurch erleichtert werden, dass komplexe Konzepte nicht durch den Gebrauch einfacher Regeln und allgemeiner Prinzipien eingeschränkt werden. Die von der CFT formulierten Maßnahmen unterstützen einen Unterricht, indem Themen in ihrer Komplexität unterrichtet werden können. Sie geben dem Lernenden eine Strukturierungshilfe.

Die Betrachtung desselben Konzeptes aus verschiedenen Perspektiven erzeugt multiple Wissensrepräsentationen, die untereinander verknüpft sind. Die unterschiedlichen Perspektiven machen den Facettenreichtum eines Konzeptes deutlich. Die beim Lernenden entstehenden multiplen Wissensrepräsentationen unterstützen die Anwendung des Wissens in anderen Kontexten. Die Schülerinnen und Schüler haben unterschiedliche Aspekte eines Konzeptes repräsentiert und nicht einen einzelnen Prototyp. Dies ist vor allem für das Lernen in Bereichen wichtig, in denen die Aspekte eines Konzeptes heterogen sind, d. h. je nach Zusammensetzung unterschiedliche Merkmale aufweisen. Geowissenschaftliche Konzepte sind multidimensional und sind daher auf eine multiperspektivische Betrachtung angewiesen. Wird ein geowissenschaftliches Konzept nur von einer einzelnen thematischen Perspektive aus betrachtet, führt dies vermutlich zu eng fokussierten Wissensrepräsentationen, die andere Facetten des Konzeptes nicht offenbaren und somit die Anwendung des Wissens in diesen Kontexten erschweren.

Untersuchungen über die Wirkung multiperspektivischen Lernens liegen bisher kaum vor (siehe Gerstenmaier & Mandl, 1995). In den bisherigen Studien von Spiro und Mitarbeitern hat fast stets die Struktur des Lernmaterials im Vordergrund gestanden. Das Lernen

mit Hypertexten ist dem Lernen mit linearen Texten gegenübergestellt worden. Die Experimentalgruppen, die mit Hypertexten gelernt haben, haben gegenüber Kontrollgruppen, die mit linearen Texten gelernt haben, bessere Transferleistungen bei Anwendungsaufgaben erzielt. In den Untersuchungen von Spiro und Mitarbeitern wird eine Experimentalgruppe, die mit Hypertext-Material gelernt hat, einer Kontrollgruppe, die mit linear strukturiertem Material gelernt hat, gegenübergestellt. Tests, die im Anschluss an die Lernphasen durchgeführt worden sind, haben ergeben, dass die Experimentalgruppe bessere Transferleistungen bei Anwenderaufgaben erzielt hat, als die Kontrollgruppe. In weiterführenden Arbeiten ist untersucht worden, welche Lernenden besonders von einer Lernumgebung im Hypertextdesign profitieren. Die Untersuchungen haben ergeben, dass Lernende, die eine Präferenz für komplexe Aufgabenstellungen haben, höhere Lernerfolge zeigen als diejenigen mit Präferenz für strukturierte Aufgabenstellungen.

### **5.3 Struktur des Lernmaterials**

Wie muss Lernmaterial gestaltet sein, damit es das Verständnis komplexer Systeme in „ill-structured domains“ unterstützt? Spiro und Mitarbeiter verwenden in ihren Studien ein Hypertextdesign, welches multiple Interpretationen und ständige Kontextvariationen beim Lernenden zulässt, und stellen diesem ein lineares Design gegenüber. Das Hypertext-Lernmaterial unterscheidet sich von dem linear strukturierten Lernmaterial ausschließlich in der Anordnung der zu vermittelnden Inhalte, die Inhalte selbst sind in beiden Fällen gleich (siehe Abb. 8 auf Seite 80). Das Hypertextdesign kann damit das aus konstruktivistischer Sicht geforderte aktive und selbstgesteuerte Lernen unterstützen.

Im Allgemeinen sind Hypertexte elektronische Texte, d. h. nur über den Computer lesbar. Lexika oder Karteikartensysteme werden nicht als Hypertexte bezeichnet, obwohl sie durch die zahlreich enthaltenen Verweise eine stark vernetzte Struktur aufweisen. „Echte“ Hypertexte grenzen sich von gedruckten Texten mit Hypertext-Eigenschaften dadurch ab, dass dem Leser ein schnelles und gezieltes Springen (per Mausklick) zu einer gesuchten Information ermöglichen.

Ein Hypertext besteht aus einzelnen Text-Teilen, die über Querverweise, so genannte (Hyper-)Links, miteinander verknüpft sind. Man spricht auch von einem Konglomerat spezifisch verbundener Text-Teile. Die Struktur der Verbindungen zwischen ausgewählten Text-Teilen basiert auf didaktischen Überlegungen des jeweiligen Autors, d. h. sie ist bedeutungsrelevant. Je nach Verbindungsstruktur ergeben sich im einfachsten Fall lineare und unterschiedlich stark vernetzte Hypertexte, wobei stärker vernetzte von größerem Interesse sind. Im Folgenden wird der Begriff Hypertext im Sinne vernetzter Hypertexte gebraucht. Ähnlich wie in einem Lexikon, werden Verbindungen zwischen einzelnen Text-

stellen hergestellt. Einzelne Informationen können über viele verschiedene Wege und von vielen verschiedenen Stellen erreicht werden. Der (Hyper-)Leser entscheidet selbst, was er wann und in welcher Reihenfolge liest. Der Hypertext-Text entsteht erst beim Hyperlesen. Die Strukturierung des Hypertextes, seine Sequenzierung und infolgedessen auch die Textsemantik wird durch den Leser konstruiert. Damit ist die Unterscheidung von Autor und Leser aufgehoben. Der Hypertext dient dem Leser als Grundlage für die Konstruktion seines persönlichen Hypertext-Textes.

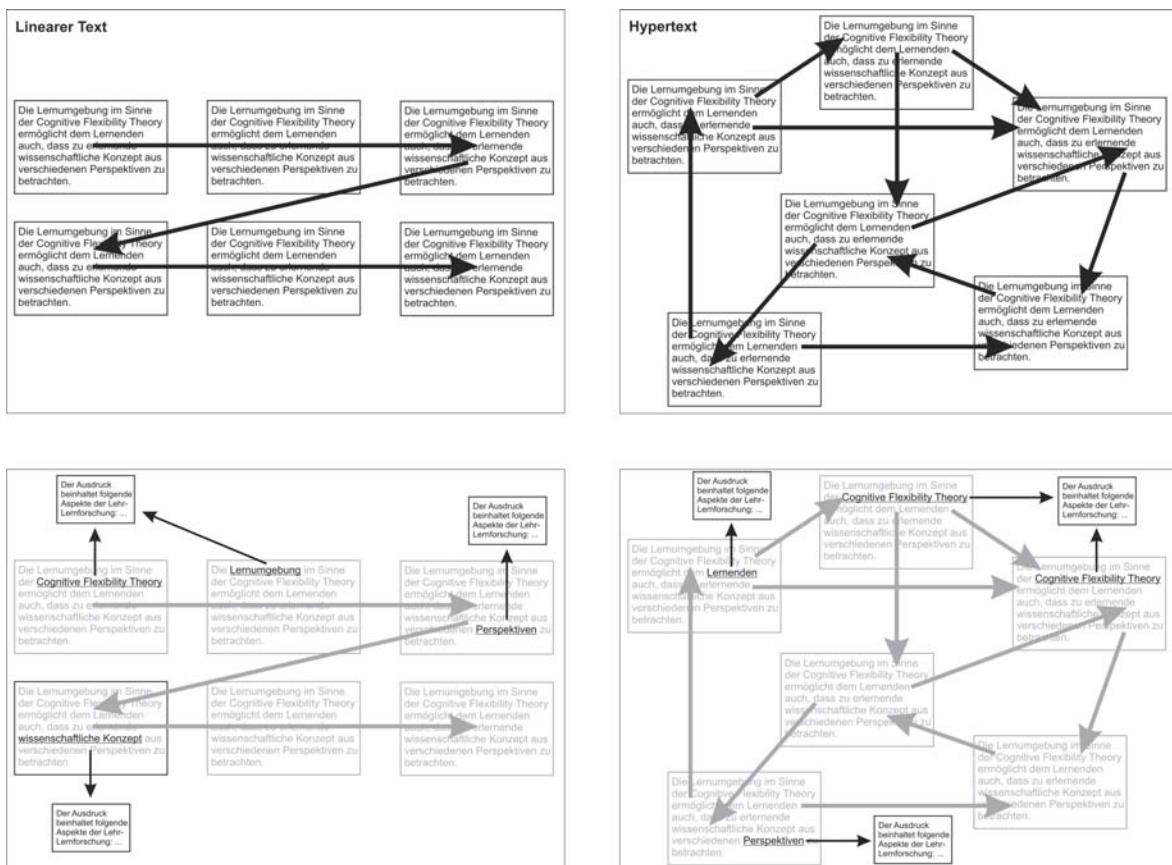


Abb. 8: Textstruktur der Lernsoftware: Linearer Text; Hypertext.

Im Bereich des Internets ist die Verwendung von Hypertexten derzeit Standard. Hypertexte werden auch immer häufiger in computerbasierten Lehr-Lernmaterialien eingesetzt. Mit der Anwendung von Hypertexten ist auf Grund ihrer besonderen Struktur die Hoffnung verbunden, eine Wissensrepräsentationsform zu erzielen, die selbstgesteuertes und problemorientiertes Lernen ermöglicht und fördert. In der Literatur werden zahlreiche Begründungen genannt, die auf der Ebene der Lernenden, der lerntheoretischen Erkenntnisse und des Lerngegenstandes ansetzen (Schanze, 2001). Die Verweisstrukturen in Hypertexten ermöglichen das selbstgesteuerte und interessengeleitete Auswählen individueller Lernpfade.



de. Der Lernende kann auf die Inhalte zugreifen, in denen er Wissen vertiefen, auffrischen oder sogar neu aufbauen wird. Zudem gelten aus kognitionspsychologischer Sicht informationsvermittelnde Systeme als kognitiv plausibel, wenn zwischen der Repräsentation im System und der Repräsentation im Rezipienten möglichst wenige Umformungsprozesse erforderlich sind. Von Hypertexten wird angenommen, dass ihr netzwerkartiger Aufbau dem semantischen Netzwerk sehr nahe kommt und somit die Einbindung der Inhalte in das Langzeitgedächtnis erleichtert. Das Lernen mit Hypertexten unterstützt vermutlich auch kognitiv aktives und konstruktivistisches Lernen. Wissen, das in einem dynamischen Erkenntnisprozess durch eigene Rekonstruktion entsteht, ist effektiver.

## 6 Einfluss von Lernermerkmalen

Individuelle kognitive Merkmale der Lernenden stellen Faktoren dar, die den Lernprozess und letztlich den Lernzuwachs beeinflussen. In Kapitel 6.1 auf Seite 82 wird der Einfluss des themenspezifischen Vorwissens beschrieben. Für das Lernen biogeochemischer Stoffkreisläufe ist vor allem der Einsatz systemischer Darstellungsformen, wie z. B. Fluss- und Wirkungsdiagramme (siehe Kapitel 2.7 auf Seite 49 ff.), von Bedeutung. Daher gilt der individuellen verbalen oder visuellen Lernpräferenz besonderes Interesse. Sie wird als weiteres Lernmerkmal berücksichtigt (siehe Kapitel 6.2 auf Seite 83).

### 6.1 Einfluss des Vorwissens

Das Vorwissen beeinflusst den Lernprozess in besonderem Maße. Ausubel (1968) sagt pointiert: „The most important single factor influencing learning is what the learner already knows.“ Der Lernende konstruiert Wissen auf der Basis bereits bestehenden Wissens selbst (Duit, 2000). Die Bedeutung des Vorwissens für den Wissenserwerb basiert nach Steiner (2001) auf zwei Prozessen. Innerhalb eines Lernprozesses wird auf bereits vorhandenes Wissen zurückgegriffen. Zudem dient bereits bestehendes Wissen den neuen Wissens-elementen als Anknüpfungspunkt. Sind bereits kognitive Schemata zu einem Inhalt ausgebildet, ist die Integration neuen Wissens in die bestehenden Wissensstrukturen leichter.

Untersuchungen zum Lernen mit Multimedia zeigen, dass sich bei Lernenden mit geringem Vorwissen sowohl stehende Bilder als auch Animationen verständnisfördernd wirken. Demgegenüber entwickeln Lernende mit hohem Vorwissen auch ohne Illustrationen ein tieferes Verständnis der präsentierten Sachverhalte (Lewalter, 1997, Mayer 1997, Mayer & Gallini, 1990). Der Einsatz graphischer Darstellungsformen kann aber auch dazu führen, dass zusätzliche kognitive Ressourcen erforderlich sind (siehe Kapitel 7 zur *Cognitive-Load*-Theorie auf Seite 84). Insbesondere für Lernende mit geringem Vorwissen kann sich dieses Phänomen negativ auf den Lernprozess auswirken. Bereits durch die Verarbeitung der Lerninhalte kommt es zu einer hohen lerngegenstandsbezogenen kognitiven Auslastung (*intrinsic cognitive load*) des Arbeitsgedächtnisses. Für die Integration zusätzlicher graphischer Repräsentationen können nur noch sehr geringe kognitive Ressourcen frei sein (vgl. Moreno & Mayer, 1999, Lowe, 1999). Notweniges Vorwissen, d. h. der vorherige Aufbau notwendiger Schemata, kann dieser kognitiven Belastung entgegenwirken.

## 6.2 Einfluss der Lernpräferenz

Eine Differenzierung von visueller und verbaler Lernpräferenz wird unter anderem bei Untersuchungen multimedialer Lernumgebungen vorgenommen (siehe Plass, Chun, Mayer & Leutner, 1998, Nerdel, 2003 und Kramer, 2005). Lernende, die eine verbale Kodierung bevorzugen, werden als Verbalisierer bezeichnet, Lernende, die visuelle präferieren, als Visualisierer.

Nach Riding und Watts (1997) ziehen Personen, die verbale interne Repräsentationen bevorzugen, verbale externe Repräsentationen beim Lernen vor. Ebenso haben Personen, die visuelle interne Repräsentationen bevorzugen, eine Vorliebe für bildhaftes Lernmaterial. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Verwendung des bevorzugten Materials den Lernprozess positiv beeinflusst. Plass, Chun, Mayer und Leutner (1998) konnten zeigen, dass Lernende beim Lesen eines fremdsprachlichen Textes von Übersetzungshilfen profitieren, die in der von ihnen jeweils vorgezogenen Kodierungsform (Text – Bild) dargeboten werden.

Für diese Studie ist der Zusammenhang zwischen systemischen Darstellungsformen, wie z. B. Fluss- und Wirkungsdiagrammen, und der individuellen verbalen oder visuellen Lernpräferenz von Interesse.

## 7 Cognitive-Load-Theorie

*Cognitive-Load*-Theorie von Sweller und Mitarbeitern beschreibt den Einfluss begrenzter Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses auf den Lernprozess (siehe Sweller, 1988, Chandler & Sweller, 1991, Sweller, Merriënboer & Pass, 1998, Pollock, Chandler & Sweller, 2002). *Cognitive load* steht für die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses bei der Informationsverarbeitung. Im deutschsprachigen Raum wird vor allem der Ausdruck *kognitive Belastung* verwendet (vgl. Kramer, 2005). Sind die Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses ausgelastet, kommt es zur ungehinderten Verarbeitung. Eine kognitive Überlastung (*cognitive overload*), d. h. eine Überschreitung der Kapazitäten, wirkt sich negativ auf den Lernprozess aus.

Nach Sweller et al. (1998) werden vier unterschiedliche Arten von *cognitive load* unterschieden: (1) *intrinsic cognitive load*, (2) *extraneous cognitive load*, (3) *germane load* und (4) *free capacity*.

- *Intrinsic cognitive load*, d. h. die lerngegenstandsbezogene kognitive Belastung (vgl. Kramer, 2005), basiert auf der Schwierigkeit des behandelten Lerngegenstands selbst. Beim Erlernen einfacher biologischer Inhalte wird das Arbeitsgedächtnis nur durch eine geringe Anzahl von Elementen belegt. Um komplexe und dynamische Systeme zu verstehen, sind zahlreiche Elemente und ihre Verknüpfungen notwendig. Diese führen zu einer relativ hohen lerngegenstandsbezogenen kognitiven Belastung. Bereits bestehende Schemata und der schrittweise Aufbau einer hierarchischen Struktur von Schemata können zu einer Minimierung dieser Belastung führen.
- *Extraneous cognitive load*, d. h. die lernumgebungsbezogene kognitive Belastung (vgl. Kramer, 2005), basiert auf der Darstellungsform der zu lernenden Information. Durch eine angemessene Gestaltung und Strukturierung des Lernmaterials oder der Lernsituation kann die Belastung minimiert werden.
- *Germane load*, d. h. die lernprozessbezogene kognitive Belastung (vgl. Kramer, 2005), stellt die für das Lernen notwendigen kognitiven Ressourcen dar. Sind die lerngegenstandsbezogene und lernumgebungsbezogene kognitive Belastung relativ gering, sind genügend kognitive Ressourcen frei. Ausreichende kognitive Ressourcen für die aktive Auseinandersetzung mit dem Lernprozess bedeuten, dass gelernt werden kann. *Germane load* sollte somit maximiert werden.
- *Free capacity*, d. h. freie Kapazität, ist vorhanden, wenn das Arbeitsgedächtnis durch die beschriebenen Größen nicht vollständig ausgelastet ist.

Bei der Gestaltung von Lernumgebungen sollte daher die lerngegenstandbezogene Belastung durch vorherige Ausbildung entsprechender Schemata minimiert werden. Die lernumgebungsbezogene Belastung sollte ebenfalls durch entsprechende Struktur- und Designmerkmale gering gehalten werden (siehe Kapitel 11 auf Seite 119 ff.).

## **Teil II**

# **Forschungsansatz**

## 8 Forschungsfragen

Der globale Kohlenstoffkreislauf ist ein komplexer biogeochemischer Stoffkreislauf, der durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Teilsysteme gekennzeichnet ist. Seine Erforschung setzt eine interdisziplinäre und systemtheoretische Betrachtung der Erde voraus. Die Analyse der für den Kohlenstoffumsatz relevanten Prozesse in Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre sowie an deren Grenzflächen basiert auf quantitativen und qualitativen Modellierungen. Deren Ergebnisse können in Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen dargestellt werden. Diese systemischen Darstellungsformen können in der Schule genutzt werden, um ein vertieftes Struktur- und Prozessverständnis des Systems zu fördern.

Durch eine computergestützte Lernumgebung mit Hypertextdesign kann die aktive Konstruktion systemischer Darstellungsformen unterstützt werden. Durch integrierte Zeichenflächen können Stofffluss- und Wirkungsdiagramme beliebig verändert werden. Hypertexte lassen außerdem Perspektivenwechsel und Kontextvariationen zu. Bei den Lernenden werden multiple Wissensrepräsentationen erreicht, die zu einer flexibleren Wissensanwendung führen.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einsatzes von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen und des induzierten Wechsels multipler inhaltlicher Perspektiven. Aus den theoretischen Überlegungen ergeben sich folgende Forschungsfragen:

Forschungsfrage 1 *Wie muss der Einsatz von systemischen Darstellungsformen erfolgen, um den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf zu unterstützen?*

Forschungsfrage 2 *Begünstigt zwei-perspektivisches Wissen über den biogeochemischen Kohlenstoffkreislauf den Lernprozess stärker als einperspektivisches Wissen?*

Forschungsfrage 3 *Wie müssen die verschiedenen Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und die unterschiedliche Anzahl inhaltlicher Perspektiven kombiniert werden, um den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf zu unterstützen?*

Forschungsfrage 4 *Wie wirkt sich das Vorwissen auf den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf aus?*

Forschungsfrage 5 *Wie wirken sich unterschiedliche Lernpräferenzen auf den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf aus?*

*Forschungsfrage 6 Wie wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebung auf die kognitive Belastung aus?*

Um diese Fragen in einer empirischen Untersuchung zu klären, wurden Hypothesen formuliert, die sich aus den in Kapitel 1 auf Seite 19 ff. beschriebenen theoretischen Grundlagen ableiten. Sie werden im folgenden Kapitel vorgestellt.



## 9 Forschungshypothesen

### 9.1 Einfluss systemischer Darstellungsformen

Die Entwicklung systemischen Denkens vollzieht sich, den Theorien von Ossimitz entsprechend, im Erlernen systemischer Darstellungsformen, insbesondere im Umgang mit Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen (vgl. Kapitel 2.7 auf Seite 49 ff.). Diese graphischen Repräsentationen erleichtern die Analyse des zu betrachtenden Systems, d. h. die Identifizierung von Struktureigenschaften und das Erkennen dynamischer Konzepte. Sie dienen als mentale Werkzeuge, um einen komplexen Lerninhalt zu strukturieren und ein tieferes Verständnis desselben zu ermöglichen. Dabei kommt der eigenständigen Konstruktion von Diagrammen eine zentrale Rolle zu. Es wird daher ein Einfluss systemischer Darstellungsformen auf den Erwerb von Wissen über den biogeochemischen Kohlenstoffkreislauf angenommen:

*Hypothese 1a Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.*

*Hypothese 1b Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.*

*Hypothese 1c Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.*

### 9.2 Einfluss mehrperspektivischen Wissens

Die folgende Hypothese basiert auf der *Cognitive-Flexibility*-Theorie (CFT) von Spiro und Mitarbeitern (vgl. Kapitel 5 auf Seite 76 ff.). Dieser Ansatz bezieht sich auf den Wissenserwerb komplexer Inhalte aus interdisziplinären Wissenschaften insbesondere bei fortgeschrittenen Lernenden. Zentraler Aspekt ist die Erzeugung multipler Wissensrepräsentationen. Die Betrachtung eines Konzeptes aus verschiedenen Perspektiven führt beim Lernenden zur Repräsentation unterschiedlicher Aspekte desselben. Zudem wird die Anwendung

des Wissens in anderen Kontexten unterstützt. Ein Einfluss mehrperspektivischen Wissens auf das mehrdimensionale biogeochemische System wird daher angenommen:

Hypothese 2 *Schülerinnen und Schüler, die zwei-perspektivisches Lernmaterial zum System Kohlenstoffkreislauf nutzen (z. B. Klimageschichte und Rohstoffnutzung), verbessern ihr Wissen über dieses Konzept stärker als Schülerinnen und Schüler, die ein-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

### **9.3 Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens**

Der *Cognitive-Flexibility*-Theorie (CFT) von Spiro und Mitarbeitern entsprechend (vgl. Kapitel 5 auf Seite 76 ff.) soll die Wissensanwendung dadurch erleichtert werden, dass komplexe Konzepte nicht durch den Gebrauch einfacher Regeln und allgemeiner Prinzipien eingeschränkt werden. Fachliche Inhalte werden in ihrer Komplexität unterrichtet. Perspektivwechsel und Kontextvariationen dienen als instruktionale Hilfestellungen, um multiple Wissensrepräsentationen beim Lernenden zu erzeugen. Auf diese Weise soll der Erwerb von Wissen über ein komplexes System gefördert und eine flexiblere Wissensanwendung unterstützt werden. Graphische Repräsentationen in Form von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen können das Erlernen eines Konzeptes durch Perspektivwechsel und Kontextvariation unterstützen. Systemische Darstellungsformen dienen als mentale Werkzeuge, um einen komplexen Lerninhalt zu strukturieren und ein tieferes Verständnis desselben zu ermöglichen. Es wird angenommen, dass sich der Einfluss des Einsatzes systemischer Darstellungsformen stärker als der Einfluss mehrperspektivischen Wissens auswirkt. Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs sind die *Hypothesen 1* und *2* (siehe Kapitel 9.1 auf Seite 89 und Kapitel 9.2 auf Seite 89 f.) zu präzisieren:

Hypothese 3a *Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 3b *Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.*

## 9.4 Einfluss des Vorwissens

Grundsätzlich wird angenommen, dass der Wissenserwerb vom Vorwissen der Lernenden positiv beeinflusst wird. Sind bereits kognitive Schemata zu einem Inhalt ausgebildet, ist die Integration neuen Wissens in die bestehenden Wissensstrukturen leichter. Es wird folgende Hypothese angenommen:

*Hypothese 4a Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.*

Zudem wird angenommen, dass Schülerinnen und Schüler unterschiedlichen Vorwissensgrads (*gering* vs. *hoch*) spezifisch auf die Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen (*mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) reagieren. Daher sind die *Hypothesen 1* und *2* (siehe Kapitel 9.1 auf Seite 89 und Kapitel 9.2 auf Seite 89 f.) unter Berücksichtigung des Vorwissens, das eine weitere unabhängige Variable darstellt, zu präzisieren. Der Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit einer bestimmten Lernumgebung und dem Vorwissen wird durch die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses mediiert.

Bei Schülerinnen und Schülern mit geringem themenspezifischem Vorwissen ist, der *Cognitive-Load-Theorie* entsprechend, die lerngegenstandsbezogene kognitive Belastung (*intrinsic cognitive load*) relativ hoch. Zudem steigert die aktive Konstruktion von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen die lernumgebungsbezogene kognitive Belastung (*extraneous cognitive load*). Demzufolge sind die kognitiven Ressourcen für die aktive Auseinandersetzung mit dem Lernprozess (*germane cognitive load*) nicht ausreichend. Das Lernen mit fertigen systemischen Darstellungsformen hingegen minimiert die lernumgebungsbezogene kognitive Belastung. Es bleiben genügend kognitive Ressourcen frei, die lernwirksam eingesetzt werden können.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen besitzen eine relativ große Anzahl kognitiver Schemata zu einem Lerngegenstand. Da die Lerninhalte mit bereits bestehenden Wissensstrukturen verknüpft werden können, ist die lerngegenstandsbezogene kognitive Belastung gering. Demzufolge sind ausreichend kognitive Ressourcen für die eigenständige Konstruktion von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen sowie die lernprozessbezogene kognitive Belastung vorhanden. Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen wird der größte lernprozessfördernde Effekt den eigenständigen Konstruktionen von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen zugeschrieben.

Demgegenüber ist der Einsatz fertiger systemischer Darstellungsformen in der Lage bei themenspezifischem Vorwissensdefiziten kompensatorisch zu wirken. Es werden folgende Hypothesen angenommen:

Hypothese 4b *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren.*

Hypothese 4c *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.*

Für das Lernen mit ein-perspektivischer bzw. zwei-perspektivischer Betrachtung des Lerninhalts können entsprechende Beziehungen angenommen werden:

Hypothese 4d *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 4e *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie ein-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Die Hypothesen 3a und 3b zur Gewichtung der Einflüsse, die sich aus dem Einsatz systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Lernmaterials ergeben, müssen, den obigen Erläuterungen entsprechend, ebenfalls präzisiert werden:

Hypothese 4f *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 4g *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.*

## **9.5 Einfluss der Lernpräferenz**

Der Einsatz systemischer Darstellungsformen beeinflusst vor allem den Wissenserwerb von Visualisierern positiv. Es werden folgende Hypothesen angenommen:

Hypothese 5a *Visualisierer profitieren stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen als Verbalisierer.*

Hypothese 5b      *Verbalisierer lernen ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut wie mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen.*

## **9.6 Kognitive Belastung**

Sind die lerngegenstandsbezogene (*intrinsic cognitive load*) und die lernumgebungsbezogene (*extraneous cognitive load*) kognitive Belastung relativ hoch, fehlen kognitive Ressourcen für die aktive Auseinandersetzung mit dem Lernprozess (*germane cognitive load*). Das Lernen wird somit behindert. Ausreichendes Vorwissen zu einem komplexen Inhalt minimiert die lerngegenstandsbezogene kognitive Belastung. Es bleiben Ressourcen für die Auseinandersetzung mit der Lernumgebung bzw. dem Lernprozess übrig. Es werden folgende Hypothesen angenommen:

Hypothese 6a      *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad sind geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.*

Hypothese 6b      *Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen, wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebungen (Einsatz von Systemdiagrammen: ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion; Anzahl inhaltlicher Perspektiven: uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch) nicht auf die kognitive Belastung aus.*

Hypothese 6c      *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sind stärker kognitiv belastet, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

**Teil III**  
**Empirischer Teil**

## 10 Methoden

### 10.1 Versuchspersonen

An der Studie nahmen 133 Schülerinnen und Schüler aus Hamburg, Hessen und Schleswig-Holstein teil. Die Versuchspersonen verteilten sich auf sechs Gymnasialkurse und einen Gesamtschulkurs. Es handelte sich um einen Ergänzungskurs<sup>39</sup> Biologie des 11. Jahrgangs, einen Methodenkurs<sup>40</sup> „System Erde“ des 11. Jahrgangs, zwei Leistungskurse Biologie des 12. Jahrgangs, zwei Leistungskurse Biologie des 13. Jahrgangs und einen Leistungskurs Chemie des 13. Jahrgangs. In den verschiedenen Kursen variierte die Anzahl der Schülerinnen und Schüler von 13 bis 28. Die Altersstruktur der Versuchspersonen wird in Kapitel 12.1.1.1 auf Seite 148 f. dargestellt. Für die Datenauswertung konnten 102 Versuchspersonen berücksichtigt werden. Die Differenz erklärt sich aus dem schulischen Kontext und individuellen Befindlichkeiten (z. B. Stundenplan, Krankheit, Computerausstattung).

### 10.2 Experimentelles Design

Zur Überprüfung der in Kapitel 8 auf Seite 87 ff. aufgeführten Forschungshypothesen wurde ein Experimentalgruppendesign mit Vor- und Nachtest entwickelt. Die Konzeption der Studie ist in Kapitel 10.2.2 auf Seite 98 genauer dargestellt. Die Versuchspersonen wurden zufällig auf eine von sechs Experimentalgruppen verteilt. In jeder dieser Gruppen lernten die Schülerinnen und Schüler mit einer der sechs Versionen der in Kapitel 6 vorgestellten computergestützten Lernumgebung. Die Lerngruppen werden in Kapitel 10.2.3 auf Seite 99 beschrieben. Um die Lernwirksamkeit der unterschiedlichen Programme zu untersuchen, wurde der Lernzuwachs zwischen Vor- und Nachtest erhoben. Die Variablen werden in Kapitel 10.2.1 auf Seite 96 ff. vorgestellt. Der zeitliche Ablauf der Studie wird in Kapitel 10.2.4 auf Seite 101 beschrieben.

---

<sup>39</sup> Ergänzungskurse dienen an Gymnasien und Gesamtschulen in Hamburg der Bildung individueller Schwerpunkte in der Sekundarstufe II. Sie können zusätzlich zu einem bereits belegten Fach gewählt werden (APO-AH, 2003).

<sup>40</sup> Der Methodikunterricht ist an Gymnasien und Gesamtschulen in Schleswig-Holstein als eigenes Fach im 11. Jahrgang organisiert. Ziel ist es, Grundlagen für das Projektlernen zu schaffen, indem elementare Formen und Verfahren wissenschaftspropädeutischen Arbeitens erarbeitet werden. Fächerübergreifendes Arbeiten ist verbindlich vorgeschrieben (Lehrplan Methodik, 2002; vgl. OVO, 1998).

## **10.2.1 Variablen**

### **10.2.1.1 Unabhängige Variablen**

Als unabhängige Variable werden in dieser Studie die Gestaltung der Lernumgebungen (*Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen, Anzahl der inhaltlichen Perspektiven*), das themenspezifische Vorwissen (*gering vs. hoch*) und die Lernpräferenz (*verbale Lernpräferenz vs. visuelle Lernpräferenz*) berücksichtigt.

#### **10.2.1.1.1 Gestaltung der Lernumgebungen**

Die Gestaltung der Lernumgebungen ist den Forschungshypothesen entsprechend mehrfach gestuft. Sowohl die Form des Einsatzes von Wirkungs- und Flussdiagrammen als auch die Anzahl der inhaltlichen Perspektiven variieren. Das konzeptionelle Design der Studie wird in Kapitel 10.2.2 auf Seite 98 f. genauer dargestellt.

#### **Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen**

Die Form des Einsatzes von Wirkungs- und Flussdiagrammen innerhalb der Lernsoftware stellt die erste unabhängige Variable dar. Die Schülerinnen und Schüler lernten ohne systemische Darstellungsformen, mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagramme oder durch eigenständige Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen.

#### **Anzahl der inhaltlichen Perspektiven**

Die Anzahl der inhaltlichen Perspektiven stellt die zweite unabhängige Variable dar. Die Schülerinnen und Schüler erhielten entweder uni-perspektivisch oder zwei-perspektivisch gestaltete Zusatzinformationen.

#### **10.2.1.1.2 Themenspezifisches Vorwissen**

Das themenspezifische Vorwissen wird als weitere unabhängige Variable berücksichtigt. Sie setzt sich additiv aus den beiden Kategorien *Vorwissen – Faktenwissen* und *Vorwissen – Verständnis* zusammen. Faktenwissen besteht in dem Erinnern von themenspezifischen Fachbegriffen, Definitionen, Regeln und Gesetzen. Unter dem Wissensaspekt Verständnis wird anwendbares Wissen über Zusammenhänge verstanden. Dazu zählen der Transfer bekannter Konzepte und Inhalte und das Problemlösen.



Um die Versuchspersonen in zwei Gruppen einzuteilen, die sich in ihrem Vorwissengrad unterscheiden, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt (siehe Kapitel 12.5.1 auf Seite 194 ff.). Die Einteilung der Cluster *Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen* basiert auf den Summenscores der Vorwissensitems im Vortest (siehe Kapitel 10.3.2.1 auf Seite 102 ff.).

#### **10.2.1.1.3 Lernpräferenz**

Die Lernpräferenz wird als dritte unabhängige Variable berücksichtigt. Um zwei Gruppen mit unterschiedlichem Grad visueller bzw. verbaler Lernpräferenz zu bestimmen, wurden Clusteranalysen durchgeführt (siehe Kapitel 12.6.1 auf Seite 230 ff.). Die Einteilung der Cluster *Geringe visuelle Lernpräferenz*, *Hohe visuelle Lernpräferenz*, *Geringe verbale Lernpräferenz*, *Hohe verbale Lernpräferenz* basiert auf subjektiven Einschätzungen der Schülerinnen und Schüler. Diese ergaben sich aus den Summenscores der visuellen bzw. verbalen Lernpräferenzitems im Vortest (siehe 10.3.2.1 auf Seite 102 ff.).

#### **10.2.1.2 Abhängige Variablen**

Als abhängige Variable werden in dieser Studie der *Lernzuwachs* der Schülerinnen und Schüler und ihre *kognitive Belastung* berücksichtigt. Die abhängige Variable *Lernzuwachs* wird in zwei Kategorien unterteilt: *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt* und *Lernzuwachs/System Erde*.

##### **10.2.1.2.1 Lernzuwachs**

###### **Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg***

Der *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt* stellt die erste abhängige Variable dar. Sie setzt sich additiv aus den beiden Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* zusammen. Im Vor- und im Nachtest werden dieselben Faktenwissensitems und Verständnisitems verwendet. Somit kann der Lernzuwachs aus der Differenz der erzielten Punktzahl im Nachtest und der erzielten Punktzahl im Vortest bestimmt werden. Für die Erhebung der abhängigen Variablen *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* werden entsprechend die Summenscores der jeweiligen Subskalen des Vortests von denen des Nachtests subtrahiert. Die Berechnung der abhängigen Variablen *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt*, *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* ist in Tab. 2 auf Seite 98 dargestellt.

<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i>	$\sum_{i=1}^n b_i - \sum_{i=1}^n a_i$
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i>	$\sum_{i=1}^m b_i - \sum_{i=1}^m a_i$
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i>	$\sum_{i=m+1}^n b_i - \sum_{i=m+1}^n a_i$

**Tab. 2:** Berechnung der abhängigen Variablen *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt*, *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* (i – Item; n – Anzahl aller Items; m – Anzahl der Faktenwissensitems; a – Itempunktzahl im Vortest; b – Itempunktzahl im Nachtest).

### **Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde***

*Lernzuwachs/System Erde* wird als weitere abhängige Variable berücksichtigt. Die Items zur Ermittlung des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* sind nur im Nachtest enthalten.

#### **10.2.1.2.2 Kognitive Belastung**

Die kognitive Belastung wird als dritte abhängige Variable berücksichtigt. Die Untersuchung der Wirkung kognitiver Belastung auf das Lernen basiert auf Selbsteinschätzungen der Schülerinnen und Schüler. Im Nachtest wird die subjektive Wahrnehmung dieser Einflussgröße erhoben.

#### **10.2.2 Konzeption der Studie**

Die Konzeption der Studie folgt einem 3x2-Design. Unabhängige Variablen sind der Einsatz von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*), die Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) sowie das Vorwissen und die Lernpräferenz. Der Lernzuwachs in den Kategorien *Lernerfolg* und *System Erde* sowie die kognitive Belastung stellen die abhängigen Variablen dar (siehe Tab. 3 auf Seite 99).

		UV 2		
		Anzahl der inhaltlichen Perspektiven		
		uni- perspektivisch (z. B. „Klima“)	zwei-perspektivisch (z. B. „Klima“ und „Klimageschichte“)	
UV 1 Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen	ohne Diagramme	Gruppe A 1	Gruppe A 2	$A 1 + A 2 =$ Gruppe A ges
	mit Diagrammen: keine aktive Kon- struktion, nur passive Rezeption	Gruppe B 1	Gruppe B 2	$B 1 + B 2 =$ Gruppe B ges
	mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion	Gruppe C 1	Gruppe C 2	$C 1 + C 2 =$ Gruppe C ges
		$A 1 + B 1 + C 1 =$ Gruppe uni ges	$A 2 + B 2 + C 2 =$ Gruppe multi ges	
AV 1 Lernzuwachs/Lernerfolg		UV 3 Vorwissen		
AV 2 Lernzuwachs/System Erde		UV 4 Lernpräferenz		
AV 3 Kognitive Belastung				

Tab. 3: Design der Studie (UV – unabhängige Variable; AV – abhängige Variable).

### 10.2.3 Lerngruppen

Die Lerngruppen ergeben sich aus dem in Kapitel 10.2.2 auf Seite 98 f. beschriebenen Design der Studie. Zu Beginn sind die 133 Versuchspersonen in die sechs Lerngruppen eingeteilt worden (siehe Tab. 4 auf Seite 100). Um eine Randomisierung der Gruppen zu erreichen, ist die Zuordnung der Schülerinnen und Schüler per Los erfolgt. Die Personen einer Lerngruppe entsprechen nicht einem Kurs, sondern stammten aus verschiedenen Kursen und Schulen. Tab. 5 auf Seite 100 zeigt die Verteilung der 102 Versuchspersonen, deren Daten bei der Auswertung berücksichtigt wurden.

		Anzahl der inhaltlichen Perspektiven		
		uni- perspektivisch (z. B. „Klima“)	zwei-perspektivisch (z. B. „Klima“ und „Klimageschichte“)	
<b>Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen</b>	<u>ohne</u> Diagramme	Gruppe A 1 16 Personen	Gruppe A 2 19 Personen	$A 1 + A 2 =$ Gruppe A ges 35 Personen
	<u>mit</u> Diagrammen: keine aktive Kon- struktion, nur passive Rezeption	Gruppe B 1 25 Personen	Gruppe B 2 25 Personen	$B 1 + B 2 =$ Gruppe B ges 50 Personen
	<u>mit</u> Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion	Gruppe C 1 23 Personen	Gruppe C 2 25 Personen	$C 1 + C 2 =$ Gruppe C ges 48 Personen
		$A 1 + B 1 + C 1 =$ Gruppe uni ges 64 Personen	$A 2 + B 2 + C 2 =$ Gruppe multi ges 69 Personen	N = 133

**Tab. 4:** Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe (N = 133).

		Anzahl der inhaltlichen Perspektiven		
		uni- perspektivisch (z. B. „Klima“)	zwei-perspektivisch (z. B. „Klima“ und „Klimageschichte“)	
<b>Einsatz von Wirkungs- und Flussdiagrammen</b>	<u>ohne</u> Diagramme	Gruppe A 1 14 Personen	Gruppe A 2 15 Personen	$A 1 + A 2 =$ Gruppe A ges 29 Personen
	<u>mit</u> Diagrammen: keine aktive Kon- struktion, nur passive Rezeption	Gruppe B 1 20 Personen	Gruppe B 2 19 Personen	$B 1 + B 2 =$ Gruppe B ges 39 Personen
	<u>mit</u> Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion	Gruppe C 1 20 Personen	Gruppe C 2 14 Personen	$C 1 + C 2 =$ Gruppe C ges 34 Personen
		$A 1 + B 1 + C 1 =$ Gruppe uni ges 54 Personen	$A 2 + B 2 + C 2 =$ Gruppe multi ges 48 Personen	N = 102

**Tab. 5:** Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe, die bei der Auswertung berücksichtigt wurden (N = 102).

### 10.2.4 Zeitlicher Ablauf der Studie

Die Studie gliedert sich in drei Abschnitte, die sich insgesamt über einen Zeitraum von fünf Tagen erstrecken. Der erste Abschnitt umfasst einen 45-minütigen Vortest. Es werden mit Hilfe eines Fragebogens, neben allgemeinen Personendaten, kognitive und motivationale Kontrollvariablen sowie themenspezifisches Wissen erhoben. Der zweite Abschnitt umfasst drei Lernsitzungen von jeweils 90 Minuten. Die drei Sitzungen finden an drei aufeinander folgenden Tagen statt. Während des Lernprozesses bearbeitet jede Schülerin bzw. jeder Schüler eigenständig das computergestützte Lernmaterial. In jeder der drei Lernsitzungen lösen die Versuchspersonen eine Aufgabe, die den sechs Lerngruppen entsprechend angepasst ist. Der letzte Abschnitt beinhaltet einen 45-minütigen Nachtest. In einem Fragebogen wird themenspezifisches Wissen erhoben. Zudem werden kognitive und motivationale Kontrollvariablen ermittelt und das Lernmaterial evaluiert. Tab. 6 zeigt den zeitlichen Ablauf des experimentellen Unterrichts der Studie.

<b>Vortest</b> <b>1. Tag: 45 Minuten</b>	<b>Lernprozess</b> <b>2.-4. Tag: jeden Tag 90 Minuten</b>	<b>Nachtest</b> <b>5. Tag: 45 Minuten</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Personendaten (z. B. Alter, Geschlecht, Leistungskurse)</li> <li>- kognitive und motivationale Kontrollvariablen (Computerwissen, Computerinteresse, Lernpräferenz, Graphische Kompetenz)</li> <li>- Themenspezifisches Wissen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schülerinnen und Schüler bearbeiten eigenständig das computergestützte Lernmaterial.</li> <li>- Es existieren, den sechs Lerngruppen entsprechend, sechs verschiedene Versionen der Lernsoftware.</li> <li>- Der Lernprozess beinhaltet drei Problemlöseaufgaben mit den Lerngruppen entsprechenden Arbeitsanweisungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kognitive und motivationale Kontrollvariablen (Kognitive Belastung, Aufmerksamkeit, Interesse)</li> <li>- Evaluation</li> <li>- Themenspezifisches Wissen</li> </ul>
<b>Fragebogen</b>	<b>Computergestütztes Lernmaterial</b>	<b>Fragebogen</b>

**Tab. 6:** Zeitlicher Ablauf der Studie.

## **10.3 Material**

### **10.3.1 Lernumgebung**

Die computergestützte Lernumgebung wird in Kapitel 11 auf Seite 119 ff. beschrieben. Die Inhaltsübersicht der Lernsoftware ist in Anhang A.1 auf Seite 288 ff. dargestellt. Die Aufgaben, die innerhalb der Lernsitzen von den Versuchspersonen bearbeitet worden sind, werden inklusive ihrer Lösungen in Anhang A.2 auf Seite 292 ff. präsentiert. In Anhang A.3 auf Seite 321 ff. werden die Begleitbögen mit der Bedienungsanleitung, die den Einstieg in die Nutzung der Lernsoftware erleichtern soll, vorgestellt.

### **10.3.2 Erhebungsinstrumente**

Die Erhebung der Daten erfolgt mit Hilfe von Fragebögen. Es wird sowohl ein Vortest als auch ein Nachtest eingesetzt. Abdrucke der originalen Fragebögen sind in Anhang B auf Seite 323 ff. zu finden. Im Folgenden werden der Vortest (siehe Kapitel 10.3.2.1) und der Nachtest (siehe Kapitel 10.3.2.2 auf Seite 109 ff.) genauer vorgestellt. Die Testinstrumente sind in Anhang C auf Seite 340 ff. zusammengefasst.

#### **10.3.2.1 Vortest**

Der Vortest dient der Erhebung von Personendaten, themenspezifischen Wissens sowie Daten zu kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen. Letztere umfassen Selbsteinschätzungen der Schülerinnen und Schüler zum Computerwissen und Computerinteresse sowie zur Lernpräferenz und zur graphischen Kompetenz.

##### **10.3.2.1.1 Personendaten**

Im Vortest wird ein personenspezifischer Benutzername erhoben. Dieser dient der eindeutigen Zuordnung der Fragebögen zu den Lernprotokollen und der Fragebögen des Vortests zu denen des Nachtests bei gleichzeitiger Wahrung der Anonymität. Er ergibt sich aus dem Anfangsbuchstaben des Vornamens der Mutter und dem des Vornamens des Vaters, sowie aus dem Geburtstag der Mutter. Der Vortest ermittelt auch das Geschlecht und das Alter der Schülerinnen und Schüler. Des Weiteren wird nach den belegten Leistungskursen und den Noten des letzten Halbjahreszeugnisses in den Fächern Biologie, Chemie, Physik, Geographie und Mathematik gefragt. Zudem werden die Schülerinnen und Schüler gebeten, ihr beliebtestes und ihr unbeliebtestes Fach anzugeben.

### **10.3.2.1.2 Themenspezifisches Wissen**

Der Vortest umfasst 18 Fragen zum themenspezifischen Wissen. Zwölf Fragen zeichnen sich durch ein Single-Choice-Format aus. Je Frage werden vier Antworten vorgegeben, von denen eine richtige Antwort auszuwählen ist. Jede richtig beantwortete Frage wird mit einem Punkt bewertet. Bei den Single-Choice-Items können demnach maximal zwölf Punkte erreicht werden. Die übrigen sechs Fragen haben ein offenes Format. Sie werden, ihrer Anzahl von zu erfragender Aspekten entsprechend, in 19 Subitems differenziert. Jedes dieser Items wird im Falle einer richtigen Beantwortung mit einem Punkt bewertet. Bei den offenen Fragen können demnach maximal 19 Punkte erreicht werden. Der Vortest setzt sich somit aus 31 Items zusammen. 18 Items dienen der Erhebung des Vorwissens und 13 Items der Erhebung des Lernerfolgs. Eine Übersicht über die gesamten Items zur Erhebung des themenspezifischen Wissens zeigt Tab. 8 auf Seite 105.

#### **Vorwissen**

Die 18 Vorwissensitems setzen sich überwiegend aus Fragen zu biologischen Phänomenen des globalen Kohlenstoffkreislaufs zusammen, wie zum Beispiel zur Fotosynthese, Zellatmung und Nahrungskette. Es sind aber auch Items zu geologischen und chemischen bzw. physikalisch-chemischen Aspekten enthalten. So wird unter anderem nach der Entstehung von Erdöl und den Charakteristika des chemischen Gleichgewichts gefragt. Die Vorwissensitems orientieren sich zum einen an den bereits unterrichteten grundlegenden biologischen, chemischen bzw. physikalisch-chemischen und geologischen Konzepten (vgl. Lehrplan Biologie für die Sekundarstufe I [1997] und II [2002], Lehrplan für Chemie für die Sekundarstufe I [1997] und II [2002], Lehrplan für Erdkunde für die Sekundarstufe I [1997] und II [2002]). Zum anderen enthält der Vorwissenstest Fragen zum globalen Kohlenstoffkreislauf. Dieses Thema soll mit der zur Studie gehörenden Lerneinheit vermittelt werden. Da einzelne Aspekte jedoch im vorangegangenen Unterricht bereits behandelt worden sind, finden auch Fragen zu diesen Bereichen Einzug in den Vorwissenstest. Die Skala „Vorwissen“ weist einen zufrieden stellenden Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha auf ( $\alpha = 0,6092$ ). Die deskriptiven Statistiken des Vorwissenstests sind in Tab. 7 auf Seite 104 dargestellt.

## Lernzuwachs/Lernerfolg

13 Items dienen zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*. Sie werden daher sowohl im Vortest als auch im Nachtest eingesetzt. Die Items umfassen Fragen zu grundlegenden chemischen, physikalisch-chemischen und geologischen Aspekten des globalen Kohlenstoffkreislaufs sowie Fragen zu den systemtheoretischen Aspekten „Fluss“ und „Flussrate“. Die Lernerfolgitems erheben vor allem Wissen über Konzepte und Inhalte, die als grundlegend für das Verständnis des Systems Kohlenstoffkreislaufs anzusehen sind. Es wird davon ausgegangen, dass einige dieser Aspekte bereits im Unterricht behandelt worden sind. Direkte Fragen zum System Kohlenstoffkreislauf sind in den Lernerfolgitems nicht enthalten. Das Wissen über die betreffenden Konzepte und Inhalte soll im Rahmen der Lernsituationen erst erworben werden. Die Skala *Lernzuwachs/Lernerfolg* des Vortests erreicht eine relativ geringe Reliabilität ( $\alpha = 0,4610$ , siehe Tab. 7). Im Zusammenhang mit Wissenstests darf Cronbachs Alpha jedoch nicht zu streng bewertet werden, da Wissenstests aufgrund der unterschiedlichen Inhalte einzelner Fragen als heterogen einzustufen sind (Bortz & Döring, 2002, S. 198). Auf Grund der Heterogenität der Fragen in der Kategorie *Lernerfolg* ist der ermittelte Reliabilitätswert somit ausreichend.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Vorwissen</i>	102	18	4,89	2,673	0,6092
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i>	102	13	4,83	1,940	0,4610

**Tab. 7:** Deskriptive Statistiken der Skalen *Vorwissen* und *Lernzuwachs/Lernerfolg* des Vortests.



		Item	Nummer der Frage	Kontext	Thema		
<b>Vortest</b>	<b>Vorwissen</b>	Faktenwissen	1	vwfkt_1	Vortest/Frage 1	Che/PhyChe	Chem. Gleichgewicht
			2	vwfkt_2	Vortest/Frage 2	Che/PhyChe	Elementarer Kohlenstoff
			3	vwfkt_3	Vortest/Frage 4	Bio	Fotosynthesegleichung
			4	vwfkt_4	Vortest/Frage 5	Che/PhyChe	Elektronenakzeptor
			5	vwfkt_5	Vortest/Frage 7	Bio	Zellatmung
			6	vwfkt_6	Vortest/Frage 8	Geo	Erdöl
			7	vwfkt_7	Vortest/Frage 15a	Bio	biochem. Prozess GKK
			8	vwfkt_8	Vortest/Frage 15b	Bio	biochem. Prozess GKK
			9	vwfkt_9	Vortest/Frage 15c	Bio	biochem. Prozess GKK
			10	vwfkt_10	Vortest/Frage 15d	Geo	geochem. Prozess GKK
			11	vwfkt_11	Vortest/Frage 15e	Geo	geochem. Prozess GKK
			12	vwfkt_12	Vortest/Frage 15f	Geo	geochem. Prozess GKK
			13	vwfkt_13	Vortest/Frage 17	Bio	Destruenten
			14	vwfkt_14	Vortest/Frage 18	Bio	Nahrungskette
	Verständnis	15	vwwst_1	Vortest/Frage 14a	Bio	Kohlenstofffluss	
		16	vwwst_2	Vortest/Frage 14b	Bio	Kohlenstofffluss	
		17	vwwst_3	Vortest/Frage 14c	Bio	Wirkungsbeziehung GKK	
		18	vwwst_4	Vortest/Frage 14d	Bio	Wirkungsbeziehung GKK	
<b>Vortest und Nachtest</b>	<b>Lernzuwachs/Lernerfolg</b>	Faktenwissen	19	leff_1; leff_1.1	Vortest/Frage 10; Nachtest/Frage 8	Che/PhyChe	Dichte des Wassers
			20	leff_2; leff_2.1	Vortest/Frage 11; Nachtest/Frage 9	Che/PhyChe	Diffusion
			21	leff_3; leff_3.1	Vortest/Frage 13; Nachtest/Frage 10	Che/PhyChe	Löslichkeit von CO <sub>2</sub>
			22	leff_4; leff_4.1	Vortest/Frage 16; Nachtest/Frage 11	Geo	Verwitterung
			23	lefv_1; lefv_1.1	Vortest/Frage 3; Nachtest/Frage 7	Che/PhyChe	chem. Gleichgewicht
			24	lefv_2; lefv_2.1	Vortest/Frage 6a; Nachtest/Frage 2a	Sys	Fluss und Flussrate
	Verständnis	25	lefv_3; lefv_3.1	Vortest/Frage 6b; Nachtest/Frage 2b	Sys	Fluss und Flussrate	
		26	lefv_4; lefv_4.1	Vortest/Frage 9a; Nachtest/Frage 3a	Sys	Fluss und Flussrate	
		27	lefv_5; lefv_5.1	Vortest/Frage 9b; Nachtest/Frage 3b	Sys	Fluss und Flussrate	
		28	lefv_6; lefv_6.1	Vortest/Frage 9c; Nachtest/Frage 3c	Sys	Fluss und Flussrate	
		29	lefv_7; lefv_7.1	Vortest/Frage 9d; Nachtest/Frage 3d	Sys	Fluss und Flussrate	
		30	lefv_8; lefv_8.1	Vortest/Frage 12a; Nachtest/Frage 4a	Che/PhyChe	phys. Kohlenstoffpumpe	
		31	lefv_9; lefv_9.1	Vortest/Frage 12b; Nachtest/Frage 4b	Che/PhyChe	phys. Kohlenstoffpumpe	
<b>Nachtest</b>	<b>Lernzuwachs/System Erde</b>	Faktenwissen und Verständnis	32	ntsys_1	Nachtest/Frage 1a	SysErd	Kohlenstoffspeicher
			33	ntsys_2	Nachtest/Frage 1b	SysErd	Kohlenstoffspeicher
			34	ntsys_3	Nachtest/Frage 1c	SysErd	Kohlenstoffflüsse
			35	ntsys_4	Nachtest/Frage 1d	SysErd	Kohlenstoffflüsse
			36	ntsys_5	Nachtest/Frage 5a	SysErd	Silikatverwitterung (Wirkung)
			37	ntsys_6	Nachtest/Frage 5b	SysErd	Silikatverwitterung (Wirkung)
			38	ntsys_7	Nachtest/Frage 5c	SysErd	Silikatverwitterung (Wirkung)
			39	ntsys_8	Nachtest/Frage 5d	SysErd	Silikatverwitterung (Fluss)
			40	ntsys_9	Nachtest/Frage 6a	SysErd	langfristiger GKK (Fluss)
			41	ntsys_10	Nachtest/Frage 6b	SysErd	langfristiger GKK (Fluss)
			42	ntsys_11	Nachtest/Frage 6c	SysErd	langfristiger GKK (Fluss)
			43	ntsys_12	Nachtest/Frage 12	Sys	Fluss und Flussrate
			44	ntsys_13	Nachtest/Frage 13	Sys	Regelkreis

**Tab. 8:** Übersicht über die Items zur Erhebung themenspezifischen Wissens. Kontext: Bio – Biologie; Che/PhyChe – Chemie/Physikalische Chemie; Geo – Geologie; Sys – Systemtheorie allg.; SysErd – System Erde. GKK – Globaler Kohlenstoffkreislauf.

### 10.3.2.1.3 Kognitive und motivationale Kontrollvariablen

Zu den kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen gehören Selbsteinschätzungen der Schülerinnen und Schüler zu ihren *Computerkenntnissen*, ihrer *Lernpräferenz* und ihrer *graphischen Kompetenz*.

#### Computerwissen und Computerinteresse

Zur Erfassung der kognitiven Kontrollvariablen *Computerkenntnisse* werden, angelehnt an Nerdel (2003), zwei Skalen von Urhahne (2002) eingesetzt (siehe Anhang C.3.1 auf Seite 352). Die Skalen umfassen jeweils vier Items. Es werden sowohl das Computerwissen (4 Items, Cronbachs Alpha = 0,7967) als auch das Computerinteresse (4 Items, Cronbachs Alpha = 0,8689) erhoben. Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 9 dargestellt.

Variable	Skala	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Computerkenntnisse</i>	<i>Computerwissen</i>	101	4	8,44	3,038	0,7967
	<i>Computerinteresse</i>	99	4	10,73	3,241	0,8689

**Tab. 9:** Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariable *Computerkenntnisse* des Vortests.

#### Lernpräferenz

Der Test zur Erhebung der Lernpräferenz besteht aus vier Subskalen mit insgesamt zwölf Items (siehe Anhang C.3.2 auf Seite 353). Er ist, angelehnt an Nerdel (2003) und Kramer (2005), dem *Individual Difference Questionnaire* (IDQ) von Paivio und Harshman (1983) entnommen. Zwei Subskalen erheben die kognitive Kontrollvariable *Visuelle Lernpräferenz*: „Gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen“ (*VisVorst*, 4 Items) und „Benutzung von bildlichen Vorstellungen beim Problemlösen“ (*VisProb*, 2 Items). Zwei weitere Subskalen beschreiben die Variable *Verbale Lernpräferenz*: „Guter sprachlicher Ausdruck“ (*VerbAusdr*, 4 Items) und „Selbsteinschätzung von Leseschwierigkeiten“ (*VerbLes*, 2 Items). Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“.

Die Items zur Erfassung der Variablen werden einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergibt vier Faktoren, die zusammen 69,238 % (Faktor 1: 30,112 %; Faktor 2: 19,428 %; Faktor 3: 10,334 %; Faktor 4: 9,364 %) der Gesamtvarianz erklären. Die Verteilung der zwölf Items auf die vier Faktoren ist in Tab. 10 dargestellt.

Skala	Item	Hauptkomponente				
		1	2	3	4	
<i>Gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen</i>	VisVorst_1	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken.	<b>0,745</b>	-0,034	-0,184	0,081
	VisProb_1	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor.	<b>0,798</b>	-0,163	0,018	0,187
	VisVorst_2	Ich denke oft in Bildern.	<b>0,823</b>	-0,188	0,127	0,134
	VisProb_2	Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.	<b>0,809</b>	0,000	0,003	0,108
<i>Guter sprachlicher Ausdruck</i>	VerbAusdr_1	Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	-0,330	<b>0,654</b>	0,071	0,163
	VerbAusdr_2	Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	0,035	<b>0,724</b>	0,317	-0,343
	VerbAusdr_3	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	0,092	<b>0,762</b>	0,257	-0,323
	VerbAusdr_4	Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	-0,197	<b>0,730</b>	-0,011	0,152
<i>Lese-schwierigkeiten</i>	VerbLes_1	Ich lese sehr langsam.	-0,069	0,060	<b>0,898</b>	0,084
	VerbLes_2	Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.	0,028	0,273	<b>0,814</b>	-0,124
<i>ohne Kategorie</i>	VisVorst_3	Wenn ich mich an eine Szene erinnere, denke ich eher in Worten als in Bildern.	0,216	-0,259	-0,096	<b>0,729</b>
	VisVorst_4	Ich finde es schwierig, mir etwas bildlich vorzustellen.	0,230	0,171	0,067	<b>0,786</b>

**Tab. 10:** Rotierte Komponentenmatrix der zwölf Items zur Lernpräferenz (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).

Die beiden Subskalen *Guter sprachlicher Ausdruck* (*VerbAusdr*, 4 Items) und *Selbsteinschätzung von Leseschwierigkeiten* (*VerbLes*, 2 Items) haben sich im Rahmen der Studie als brauchbar erwiesen. Die beiden Subskalen *Gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen* (*VisVorst*, 4 Items) und *Benutzung von bildlichen Vorstellungen beim Problemlösen* (*VisProb*, 2 Items) konnten nur in veränderter Form verwendet werden (vgl. Nerdel, 2003). Die deskriptiven Statistiken der Variablen *Visuelle Lernpräferenz* und *Verbale Lernpräferenz* sind in Tab. 11 und Tab. 12 dargestellt.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Visuelle Lernpräferenz</i>	99	6	17,42	3,549	0,7899
<i>Verbale Lernpräferenz</i>	98	6	17,56	3,467	0,7526

**Tab. 11:** Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen *Visuelle Lernpräferenz* und *Verbale Lernpräferenz* des Vortests.

Variable	Skala	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Visuelle Lernpräferenz</i>	gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen	99	4	10,48	2,977	0,8316
	ohne Kategorie	101	2	6,93	1,116	0,4644
<i>Verbale Lernpräferenz</i>	guter sprachlicher Ausdruck	99	4	11,12	2,520	0,7367
	Leseschwierigkeiten	101	2	6,43	1,577	0,7165

**Tab. 12:** Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen *Visuelle Lernpräferenz* und *Verbale Lernpräferenz* des Vortests.

Der Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha für die Subskala *VerbAusdr* liegt bei  $\alpha = 0,7367$ , der für die Subskala *VerbLes* bei  $\alpha = 0,7165$ . Die Gesamtskala zeigt mit  $\alpha = 0,7526$  ebenfalls einen zufrieden stellenden Reliabilitätswert. Aufgrund der Analysen wird die verbale Lernpräferenz mit einer Skala gemessen, die sich aus den Subskalen *Guter sprachlicher Ausdruck* (*VerbAusdr*, 4 Items) und *Selbsteinschätzung von Leseschwierigkeiten* (*VerbLes*, 2 Items) zusammensetzt.

Der Reliabilitätskoeffizient für die gesamte Skala zur Messung der visuellen Lernpräferenz beträgt  $\alpha = 0,7899$  und ist somit ebenfalls zufrieden stellend. Die Items laden jedoch nicht auf den gleichen Faktoren wie bei Paivio und Harshman (1983) (vgl. Nerdel, 2003). Die Items *VisVorst\_1*, *VisVorst\_2*, *VisProb\_1* und *VisProb\_2* laden auf einem Faktor. Sie wei-

sen mit  $\alpha = 0,8316$  einen guten Reliabilitätswert auf. Die weiteren beiden Items, *VisVorst\_3* und *VisVorst\_4*, laden auf dem vierten Faktor und erzielen nur einen sehr geringen Reliabilitätswert ( $\alpha = 0,4644$ ). Die visuelle Lernpräferenz wird daher im Folgenden mit einer Skala gemessen, die sich aus den vier Items *VisVorst\_1*, *VisVorst\_2*, *VisProb\_1* und *VisProb\_2* zusammensetzt (vgl. Nerdel, 2003).

### Graphische Kompetenz

Zur Erhebung der Selbsteinschätzung von graphischer Kompetenz werden vier Items verwendet. Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“. Die verwendete Skala weist mit  $\alpha = 0,6666$  einen zufrieden stellenden Reliabilitätskoeffizienten auf. Die deskriptiven Statistiken der kognitiven Kontrollvariable *Graphische Kompetenz* sind in Tab. 13 dargestellt.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Graphische Kompetenz</i>	100	4	9,50	2,397	0,6666

**Tab. 13:** Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariable *Graphische Kompetenz* des Vortests.

### 10.3.2.2 Nachttest

Mit dem Nachttest werden themenspezifisches Wissen und Daten zu kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen erhoben. Letztere umfassen Selbsteinschätzungen der Schülerinnen und Schüler zur kognitiven Belastung sowie zum Interesse und zur Aufmerksamkeit. Zudem werden Fragen zur Evaluation der Lernumgebung gestellt.

#### 10.3.2.2.1 Themenspezifisches Wissen

Der Nachttest beinhaltet 13 Fragen zum themenspezifischen Wissen. Sieben Fragen zeichnen sich durch ein Single-Choice-Format aus. Je Frage werden vier Antworten vorgegeben, von denen eine richtige Antwort auszuwählen ist. Jede richtig beantwortete Frage wird mit einem Punkt bewertet. Bei den Single-Choice-Items können demnach maximal sieben Punkte erreicht werden. Die übrigen sechs Fragen haben ein offenes Format. Sie werden, ihrer Anzahl von zu erfragender Aspekten entsprechend, in 19 Subitems differenziert. Jedes dieser Items wird im Falle einer richtigen Beantwortung mit einem Punkt bewertet. Bei den offenen Fragen können demnach maximal 19 Punkte erreicht werden.

Der Nachtest setzt sich somit aus 26 Items zusammen. 13 Items dienen der Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie Lernerfolg und 13 Items der Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie System Erde. Eine Übersicht über die gesamten Items zur Erhebung des themenspezifischen Wissens zeigt Tab. 8 auf Seite 105.

### **Lernzuwachs/Lernerfolg**

Im Anschluss an die Lernsitzungen werden die gleichen 13 Lernerfolgitems verwendet, die im Vortest (siehe Kapitel 10.3.2.1 auf Seite 103) eingesetzt worden sind. Auf diese Weise kann der Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* als Differenz der erzielten Punktzahl im Nachtest und der erzielten Punktzahl im Vortest gemessen werden (siehe Kapitel 10.2.1.2 auf Seite 97). Die Items erheben das Wissen über grundlegende chemische, physikalisch-chemische und geologische Aspekte des globalen Kohlenstoffkreislaufs sowie über die systemtheoretischen Aspekte „Fluss“ und „Flussrate“. Diese Konzepte und Inhalte sind als grundlegend für das Verständnis des Systems Kohlenstoffkreislauf anzusehen. Die Skala *Lernzuwachs/Lernerfolg* des Nachtests erreicht mit  $\alpha = 0,3851$  eine relativ geringe Reliabilität (siehe Tab. 14). Auf Grund der Heterogenität der Fragen in der Kategorie Lernerfolg ist der ermittelte Reliabilitätswert jedoch ausreichend (siehe Kapitel 10.3.2.1 auf Seite 103 f.).

### **Lernzuwachs/System Erde**

Die 13 *System Erde*-Items erheben das Wissen über die fachlichen Inhalte der Aufgaben, die im Rahmen der Lernsitzungen von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet worden sind. Sie werden aus drei offenen Fragen und zwei Fragen mit Single-Choice-Format generiert. Es wird das Wissen über den anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf, die Silikatverwitterung und die physikalische Kohlenstoffpumpe gemessen. Der Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* beinhaltet somit direkte Frage zum System Kohlenstoffkreislauf. Diese Fragen sind ausschließlich im Nachtest enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass die Themen der Lernsitzungen nicht im vorangegangenen Unterricht berücksichtigt worden sind. Die Skala *Lernzuwachs/System Erde* weist einen ausreichenden Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha auf ( $\alpha = 0,5763$ ). Die deskriptiven Statistiken des Vorwissenstests sind in Tab. 14 dargestellt.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i>	102	13	5,24	1,925	0,3851
<i>Lernzuwachs/System Erde</i>	102	13	3,26	2,029	0,5763

**Tab. 14:** Deskriptive Statistiken der Skalen *Lernzuwachs/Lernerfolg* und *Lernzuwachs/System Erde* des Nachtests.

### 10.3.2.2.2 Kognitive und motivationale Kontrollvariablen

#### Kognitive Belastung

Zur Erfassung der kognitiven Belastung wird ein nach Nerdel (2003) und Kramer (2005) adaptierter Test verwendet. Er basiert ursprünglich auf einer Skala, die dem Test zur kognitiven Belastung von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala besteht aus vier Subskalen. Zwei Items erheben Selbsteinschätzungen der benötigten Anstrengung (*Anstr*), vier Items die der Komplexität von Lerninhalt und Lernumgebung (*KomplxLI* bzw. *KomplxLU*). Zwei Items dienen der Erhebung der subjektiven Wahrnehmung geistiger Auslastung (*KogAusl*), zwei weitere der eigenen Einschätzung des inhaltlichen Verständnisses (*Verstd*). Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat. Die Gesamtskala weist einen hohen Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha auf ( $\alpha = 0,8827$ ). Die deskriptiven Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen *Kognitive Belastung* sind in Tab. 15 auf Seite 112 dargestellt.

#### Aufmerksamkeit

Zur Erfassung der Aufmerksamkeit wird ein nach Nerdel (2003) adaptierter Test verwendet. Dieser besteht aus zwei Items. Die Items sind durch ein fünfstufiges Antwortformat gekennzeichnet. Sie basieren ursprünglich auf einer Skala, die dem Test von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala (*Aufm*) erzielt mit  $\alpha = 0,5565$  nur einen geringen Reliabilitätswert. Die deskriptiven Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen *Aufmerksamkeit* sind in Tab. 15 auf Seite 112 dargestellt.

#### Interesse

Zur Erfassung des situationalen Interesses wird ein nach Nerdel (2003) und Kramer (2005) adaptierter Test verwendet. Er basiert ursprünglich auf einer Skala, die dem Test zur kognitiven Belastung von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala besteht aus fünf Items. Um den Sinnzusammenhang der Fragen nicht zu verändern, musste die Skala in dieser Studie auf drei Items reduziert werden (*SitInt*). Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwort-

format. Der Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha der Gesamtskala ist zufrieden stellend ( $\alpha = 0,6644$ ). Die deskriptiven Statistiken der motivationalen Kontrollvariable *Interesse* sind in Tab. 15 aufgeführt.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Kognitive Belastung</i>	99	10	32,96	7,686	0,8827
<i>Aufmerksamkeit</i>	100	2	5,63	1,612	0,5565
<i>Interesse</i>	102	3	6,96	2,333	0,6644

**Tab. 15:** Deskriptive Statistiken der kognitiven und motivationalen Kontrollvariable *Kognitive Belastung*, *Aufmerksamkeit* und *Interesse* des Nachttests.

Zur Bestimmung der Dimensionalität des Tests werden die Items der kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen *Kognitive Belastung* (10 Items), *Interesse* (3 Items) und *Aufmerksamkeit* (2 Items) einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergibt drei Faktoren, die zusammen 62,405 % (Faktor 1: 38,895 %; Faktor 2: 15,524 %; Faktor 3: 7,986 %) der Gesamtvarianz erklären. Die Verteilung der 15 Items auf die drei Faktoren ist in Tab. 16 auf Seite 113 dargestellt.

Die beiden Items zur Aufmerksamkeit (*Aufm*) laden nicht auf einem Faktor. Die dritte Hauptkomponente umfasst die Items *SitInt\_2* und *Aufm\_2*. Der Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha ist relativ niedrig ( $\alpha = 0,5573$ , siehe Tab. 17 auf Seite 114). Diese Skala wird daher nicht weiter berücksichtigt. Auch die drei Items zum situationalen Interesse (*SitInt*) laden nicht auf einem Faktor. Die zweite Hauptkomponente umfasst die Items *SitInt\_1*, *SitInt\_3* und *KomplxLU\_3*. Der Reliabilitätswert dieser Skala ist ebenfalls nicht zufrieden stellend ( $\alpha = -0,0870$ ). Die Skala wird daher bei der Analyse der Daten nicht verwendet. Zehn Items laden auf dem ersten Faktor. Diese Hauptkomponente umfasst neun Items zur kognitiven Belastung und das Item *Aufm\_1*. Der Reliabilitätskoeffizient ist mit  $\alpha = 0,8408$  hoch. Da sich das Items *Aufm\_1* ebenfalls auf einen kognitiven Aspekt bezieht und eine gute Reliabilität aufweist, werden die zehn Items der ersten Hauptkomponente im Folgenden als Skala zur Messung der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung verwendet.



			Hauptkomponente		
Skala	Item		1	2	3
<i>Kognitive Belastung (und Aufmerksamkeit)</i>	KomplxLI_1	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<b>0,849</b>	-0,043	-0,154
	KomplxLU_1	Waren die Texte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<b>0,799</b>	-0,111	-0,046
	Anstr_2	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen?	<b>0,799</b>	-0,280	0,057
	KomplxLU_2	Waren die Aufgaben des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex?	<b>0,757</b>	-0,017	-0,249
	KogAusl_1	Fühlten Sie sich durch die Informationsmenge des Lernprogramms geistig stark belastet?	<b>0,746</b>	-0,288	0,299
	Verstd_1	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich?	<b>0,717</b>	-0,290	-0,175
	KogAusl_2	Wie stark fühlten Sie sich durch die Inhalte des Lernprogramms geistig gefordert?	<b>0,679</b>	0,073	0,447
	Verstd_2	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot?	<b>0,652</b>	-0,158	0,163
	Anstr_1	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen?	<b>0,599</b>	-0,216	0,553
	Aufm_1	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren?	<b>-0,478</b>	0,473	0,386
<i>Interesse (und navigationsbezogene Komplexität)</i>	SitInt_3	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen?	-0,132	<b>0,836</b>	0,196
	SitInt_1	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm?	-0,040	<b>0,711</b>	-0,056
	KomplxLU_3	Fiel Ihnen die Bedienung der Lernsoftware eher leicht oder eher schwer?	0,140	<b>-0,544</b>	-0,064
<i>Aufmerksamkeit (und Interesse)</i>	SitInt_2	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie?	-0,234	0,406	<b>0,587</b>
	Aufm_2	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms?	0,041	0,090	<b>0,796</b>

**Tab. 16:** Rotierte Komponentenmatrix der 15 Items zu den Variablen *Kognitive Belastung*, *Aufmerksamkeit* und *Interesse* (Die Zuordnung eines Items zu einem Faktor ist durch Fettdruck hervorgehoben.).

Skala	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Kognitive Belastung (und Aufmerksamkeit)</i>	99	10	33,17	6,847	0,8408
<i>Interesse (und navigationsbezogene Komplexität)</i>	102	3	6,60	1,863	-0,0870
<i>Aufmerksamkeit (und Interesse)</i>	100	2	5,75	1,660	0,5573

**Tab. 17:** Deskriptive Statistiken der kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen *Kognitive Belastung*, *Interesse* und *Aufmerksamkeit* des Nachttests.

### 10.3.2.2.3 Erfahrungen mit Systemdiagrammen

Drei Items erheben die Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen. Sie sind nur in den Fragebögen der Schülerinnen und Schülern enthalten, die aus den Lerngruppen mit fertigen Systemdiagrammen (*B 1* und *B 2*) oder mit eigenständiger Diagrammkonstruktion (*C 1* und *C 2*) stammen. Die Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat. Der Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha der Gesamtskala ist zufrieden stellend ( $\alpha = 0,6467$ ). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 18 aufgeführt.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Erfahrungen mit Systemdiagrammen</i>	71	3	7,73	2,507	0,6467

**Tab. 18:** Deskriptive Statistiken der Skala *Erfahrungen mit Systemdiagrammen* des Nachttests.

### 10.3.2.2.4 Evaluation

Neun Items dienen der Evaluation der Lernumgebung. Es werden drei Subskalen verwendet, *Evaluation des Softwaredesigns* (vier Items), *Evaluation der Softwarenavigation* (drei Items) und *Evaluation der Softwarestruktur* (zwei Items). Die ersten beiden Subskalen sind den Evaluationsfragen von Kramer (2005) entnommen. Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat. Die Skala erreicht einen guten Reliabilitätswert ( $\alpha = 0,7760$ ). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 19 auf Seite 115 aufgeführt. Der Evaluationsfragebogen enthielt zudem zwei Items mit offenem Antwortformat: „*Was gefiel Ihnen an der Lernsoftware gut?*“ und „*Was fanden Sie an der Lernsoftware schlecht?*“.

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Evaluation</i>	100	9	28,12	6,122	0,7760

**Tab. 19:** Deskriptive Statistiken der Skala *Evaluation* des Nachttests.

Zur Dimensionsreduktion werden die Items der Subskalen *Evaluation des Softwaredesigns*, *Evaluation der Softwarenavigation* und *Evaluation der Softwarestruktur* einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergibt zwei Faktoren, die zusammen 54,789 % (Faktor 1: 37,405 %; Faktor 2: 17,384 %) der Gesamtvarianz erklären. Die Verteilung der neun Items auf die zwei Faktoren ist in Tab. 21 auf Seite 116 dargestellt. Die vier Items der Subskala *Evaluation des Softwaredesigns* laden auf dem ersten Faktor. Die drei Items der Subskala *Evaluation der Softwarenavigation* laden auf dem zweiten Faktor. Die beiden Items der dritten Subskala *Evaluation der Softwarestruktur* laden jedoch nicht zusammen auf einem weiteren Faktor. Das Item *EvalStruk\_2*, das sich auf die bildliche Struktur des Lernprogramms bezieht, ist der ersten Hauptkomponente zugeordnet. Das Item *EvalStruk\_1*, das sich auf die inhaltliche Struktur der Software bezieht, gehört zur zweiten Hauptkomponente. Somit umfasst der erste Faktor Items zur bildlichen und der zweite Faktor zur inhaltlichen Softwaregestaltung. Im Folgenden werden daher die beiden Subskalen *Evaluation des Designs und der bildlichen Struktur* (fünf Items) und *Evaluation der Navigation und der inhaltlichen Struktur* (vier Items) verwendet. Beide Skalen erzielen mit  $\alpha = 0,7442$  bzw.  $\alpha = 0,7403$  einen zufriedenstellenden Reliabilitätswert (siehe Tab. 20).

Variable	N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Evaluation des Designs und der bildlichen Struktur</i>	101	5	16,52	3,593	0,7442
<i>Evaluation der Navigation und der inhaltlichen Struktur</i>	101	4	11,60	3,787	0,7403

**Tab. 20:** Deskriptive Statistiken der Subskalen *Evaluation des Designs und der bildlichen Struktur* und *Evaluation der Navigation und der inhaltlichen Struktur* des Nachttests.

			Hauptkomponente	
Skala	Item		1	2
<i>Evaluation des Designs und der bildlichen Struktur</i>	EvalDesign_1	Wie gefiel Ihnen die äußere Gestaltung (Design) der Lernsoftware?	<b>0,830</b>	0,190
	EvalDesign_2	Wie gelungen fanden Sie die Farbgestaltung der Lernsoftware?	<b>0,788</b>	0,020
	EvalStruk_2	Wie gefiel Ihnen die Bildschirmaufteilung der Lernsoftware?	<b>0,629</b>	0,142
	EvalDesign_4	Wie gelungen fanden Sie die Gestaltung der Abbildungen?	<b>0,618</b>	0,024
	EvalDesign_3	Wie gefiel Ihnen das Aussehen der Texte?	<b>0,603</b>	0,212
<i>Evaluation der Navigation und der inhaltlichen Struktur</i>	EvalNavi_1	Wie gut kamen Sie mit der Navigation innerhalb der Lernsoftware zurecht?	0,197	<b>0,800</b>
	EvalNavi_3	Wie oft hatten Sie das Gefühl nicht mehr zu wissen wo Sie sich innerhalb der Lernsoftware befinden?	0,130	<b>0,784</b>
	EvalNavi_2	Wie häufig sind Sie nicht an einen Punkt innerhalb der Lernsoftware gelangt zu dem Sie wollten?	-0,061	<b>0,711</b>
	EvalStruk_1	Wie gelungen fanden Sie die Strukturierung der Lerninhalte?	0,407	<b>0,627</b>

**Tab. 21:** Rotierte Komponentenmatrix der neun Items der Skala *Evaluation: EvalDesign – Evaluation des Softwaredesigns; EvalStruk – Evaluation der Softwarestruktur; EvalNavi – Evaluation der Softwarenavigation* (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).

## 10.4 Statistische Auswertungsmethoden

Die Auswertung der in dieser Arbeit erhobenen Daten ist mit Hilfe gängiger statistische Methoden erfolgt. Diese werden im Folgenden in allgemeiner Form beschrieben. Für eine ausführliche Darstellung und Erläuterung der statistischen Forschungsmethoden sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (Bortz, 1999; Bortz & Döring, 2002). Die klassischen Testauswertungen sind mit Hilfe des Statistikprogramms *SPSS 11.5 für Windows* (2002) und der Software *G\*Power 2* (Faul & Erdfelder, 1992) erfolgt. Latente Klassenanalysen sind mit dem Programm *Winmira 2001* (Davies, 2001) durchgeführt worden. Zuordnungswahrscheinlichkeiten sind ergänzend zu diesem Programm mit *Microsoft® Office Excel 2003* berechnet worden. Deskriptive Statistiken und Kreuztabellierungen sind mit Hilfe des Programms *SPSS 11.5 für Windows* (2002) erstellt worden.

### 10.4.1 Deskriptive Statistik

Die in dieser Arbeit verwendete deskriptive Statistik umfasst die Berechnung von Mittelwerten, Skalenmittelwerten, Standardabweichungen sowie des Minimums und Maximums. Der Mittelwert ist das arithmetische Mittel der Messwerte. Er berechnet sich aus dem Quotienten der Summe der Messwerte und ihrer Anzahl. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Messwerte. Sie ist die Quadratwurzel aus der Varianz. Diese wird berechnet aus der Summe der Abweichungsquadrate aller Messwerte von ihrem arithmetischen Mittel, dividiert durch die um eins verminderte Anzahl der Werte. Das Minimum ist der kleinste, das Maximum der größte Messwert.

### 10.4.2 t-Test und Varianzanalysen

Anhand von t-Tests und Varianzanalysen werden Unterschiede der erreichten Mittelwerte überprüft. Der t-Test dient der Analyse des Einflusses einer unabhängigen Variablen mit zwei Gruppen auf eine abhängige Variable. Es wird der *t-Test bei unabhängigen Stichproben* eingesetzt. Die Varianzanalyse wird bei der Untersuchung von Mittelwertsunterschieden zwischen mehr als zwei Gruppen verwendet. Mit Hilfe der *einfaktorischen Varianzanalyse (ANOVA)* wird der Einfluss einer unabhängigen Variablen mit mehr als zwei Gruppen auf eine abhängige Variable überprüft. Die zweifaktorielle Varianzanalyse dient der Analyse des Einflusses von zwei unabhängigen Variablen mit mehr als zwei Gruppen auf eine abhängige Variable. Dabei handelt es sich um eine *univariate Varianzanalyse*, die auf einem allgemeinen linearen Modell basiert. Einzelvergleiche zwischen zwei Mittelwerten werden anhand eines *Scheffé-Tests* untersucht. Das Signifikanzniveau wird auf 0,05 festgesetzt ( $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit), die  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit auf 0,2 (siehe Bortz & Döring, 2002). Zur Überprüfung von Nullhypothesen werden umgekehrte Signifikanzniveaus angenommen ( $\alpha = 0,2$ ;  $\beta = 0,05$ ). Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit für einen  $\beta$ -Fehler kann die Teststärke (Power) berechnet werden:  $1 - \beta$ .

Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung	Symbol
$p > 0,1$	nicht signifikant	n.s.
$p \leq 0,1$	schwach signifikant	◦
$p \leq 0,05$	signifikant	*
$p \leq 0,01$	hoch signifikant	**
$p \leq 0,001$	höchst signifikant	***

Tab. 22: Irrtumswahrscheinlichkeit.

### **10.4.3 Latente Klassenanalyse**

Die Latente Klassenanalyse (LCA) ist eine probabilistische Methode die über das Profil der Itemantworten qualitative Personenunterschiede erfasst. Ziel ist es, die Versuchspersonen verschiedenen Klassen zuzuordnen. Personen einer Klasse unterscheiden sich in ihrem Antwortverhalten minimal. Zwischen den Klassen sind die Unterschiede maximal. Die Anzahl der latenten Klassen wird bei der Modellierung vorgegeben. Die LCA berechnet die Itemschwierigkeiten für jede Klasse. Die Itemschwierigkeit entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Versuchsperson einer Klasse das entsprechende Item richtig löst. Es werden Zuordnungswahrscheinlichkeiten ermittelt, mit denen die Versuchspersonen den Klassen angehören. Eine Person wird einer bestimmten Klasse zugeordnet, wenn ihre Zuordnungswahrscheinlichkeit bezüglich dieser Klasse maximal ist. Eine zusammenfassende Beschreibung der wichtigsten Aspekte der LCA findet sich bei Nerdel (2003). Für eine ausführliche Darstellung und Erläuterung der Testtheorie wird auf das Buch „Lehrbuch Testtheorie – Testkonstruktion“ von Rost (1996) verwiesen.

## 11 Gestaltung der Lernumgebung

Im Rahmen dieser Dissertation ist eine Lernsoftware zum Thema *Der globale Kohlenstoffkreislauf im Systems Erde* entwickelt worden. Die Programmierung hat die Firma *MMCD interactive in science*<sup>41</sup> übernommen. Die sechs Versionen der Lernsoftware dienen der Variation der Lerngruppen (siehe Kapitel 10.2.3 auf Seite 99). Sie sollen den Einfluss unterschiedlicher Formen des Einsatzes von Fluss- und Wirkungsdiagrammen sowie die Verwendung multipler Repräsentationen überprüfen. Es wurde ein Hypertextdesign gewählt, dass sich zur Vermittlung von komplexen Inhalten bewährt hat (siehe Kapitel 5 auf Seite 76 ff.).

In Kapitel 11.1 werden die Inhalte, die zum Thema ausgewählt wurden, dargestellt. Insbesondere werden die Fachinhalte der Lernaufgaben, die in die Software integriert sind, vorgestellt (siehe Kapitel 11.1.1 auf Seite 121 ff.). In Kapitel 11.2 auf Seite 124 ff. wird die allgemeine Struktur der Lernumgebung beschrieben. Kapitel 11.3 auf Seite 126 ff. stellt die grundlegenden Designelemente der Software vor. Es existieren sechs Versionen der Lernsoftware. Die fachinhaltlichen, strukturellen und designspezifischen Unterschiede dieser Lernumgebungen werden in Kapitel 11.4 auf Seite 138 ff. dargestellt.

### 11.1 Fachinhaltliche Darstellung der Lernumgebung

Auf der Grundlage der in Kapitel 1 auf Seite 19 ff. dargestellten fachwissenschaftlichen Theorien werden die Inhalte zum Thema *Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde* zusammengestellt. Zentraler Aspekt bei der Auswahl ist die systemtheoretische und interdisziplinäre Betrachtung des globalen Kohlenstoffkreislaufs gewesen, die in sieben Kapiteln dargestellt wird (siehe Abb. 9 auf Seite 121). Die gesamte Inhaltsübersicht der Lernsoftware ist im Anhang (siehe A.1 auf Seite 288 ff.) dargestellt.

Das erste Kapitel der Lernsoftware befasst sich mit dem Systemkonzept. Auf der Grundlage systemtheoretischer Konzepte (siehe Kapitel 2 auf Seite 42 ff.) wird die Erde als System beschrieben und insbesondere in die Thematik biogeochemischer Stoffkreisläufe eingeführt (siehe Kapitel 1.1 auf Seite 19 ff.). Zu den systemtheoretischen Aspekten zählen die Definition eines Systems und systemische Darstellungsformen. Die Systemdefinition reicht von Zustands-, Entwicklungs- und Eigenschaftsbeschreibungen bis hin zu den Prozessen Systemanalyse und Modellbildung.

---

<sup>41</sup> MMCD interactive in science – Schadowstr. 70 – 40212 Düsseldorf.

Kapitel 2 der Lernsoftware zeigt die prozentuale Häufigkeit von Kohlenstoff im Vergleich zu anderen Elementen im System Erde auf. Zudem werden unterschiedliche Arten von Kohlenstoff, elementare Formen und chemische Verbindungen, vorgestellt. In Kapitel 3 der Lernsoftware werden die fünf Kohlenstoffspeicher im System Erde, Atmo-, Bio-, Hydro-, Pedo- und Lithosphäre, vorgestellt. Das vierte Kapitel der Lernsoftware beschreibt auf der Grundlage des Sphärenmodells die Kohlenstoffflüsse zwischen den Speichern. Die Entwicklung der verschiedenen Kohlenstoffspeicher und Kohlenstoffflüsse im Verlauf der Erdgeschichte wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Das sechste Kapitel der Lernsoftware befasst sich mit den Prozessen, die die Kohlenstoffflüsse im System Erde bestimmen. Häufig ändern Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen beim Fluss in einen anderen Speicher ihren Aggregatzustand oder reagieren chemisch zu einer anderen Kohlenstoffverbindung. Daher sind Kohlenstoffflüsse zumeist mit Umwandlungsprozessen verbunden. Innerhalb der Lernsoftware werden vierzehn grundlegende Prozesse vorgestellt: Diffusion, Lösungsprozess, Fotosynthese, Atmung, Verwitterung, Gesteinsmetamorphose, Vulkanismus, Verbrennung, Mineralisierung, Ausfällung, Sedimentation, Diagenese, biogene Carbonatbildung und Ausgasung.

Kapitel 7 der Lernsoftware beinhaltet den eigentlichen Kohlenstoffkreislauf. Es sind vier Teilsysteme des Systems Kohlenstoffkreislauf ausgewählt worden und zwar der kurzfristige (siehe Kapitel 1.2.3 auf Seite 26 ff.) und der langfristige Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.4 auf Seite 27 ff.) sowie der Kohlenstoffkreislauf im Ozean (siehe Kapitel 1.2.5 auf Seite 31 ff.) und der terrestrische Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 1.2.6 auf Seite 38 ff.). Zudem werden anthropogene Einflüsse thematisiert (siehe Kapitel 1.2.7 auf Seite 38 ff.). Die Sequenzierung des Systems Kohlenstoffkreislauf dient der didaktischen Reduktion des Lerninhalts. Das Gesamtsystem ist so komplex, dass es einfacher ist, sich zunächst mit einzelnen Elementen zu beschäftigen (vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002). Die Auswahl der Teilsysteme unterstützt zum einen die spezifische Betrachtung unterschiedlicher Lebensräume. Zum anderen wird der Aspekt Zeit betont. Neben dem eigentlichen Kohlenstofffluss zwischen zwei Speichern sind die Zeiträume, die der Kohlenstoff in einem Speicher verbleibt, von Bedeutung. Zudem sind die Zeiträume wichtig, in denen sich der Transport vollzieht (vgl. Ittekkot, Rixen, Suthhof et al., 2002).

Die in der Lernsoftware verwendeten Kohlenstoffdaten stammen größtenteils aus den IPCC<sup>42</sup>-Berichten (siehe IPCC, 2001) und der wissenschaftlichen Literatur, die diesen Berichten zugrunde liegt.

---

<sup>42</sup> IPCC steht für **I**nter**g**overnmental **P**anel of **C**limate **C**hange. Es handelt sich um einen weltweiten Zusammenschluss führender Klimaforscher, der von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) konstituiert wird. In Abständen von einigen Jahren wird der Wissensstand der Klimaforschung zusammengetragen.



## **Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde**

- (1) Das Systemkonzept**
- (2) Kohlenstoff im System Erde**
- (3) Kohlenstoffspeicher**
- (4) Kohlenstoffflüsse**
- (5) Entwicklung des Systems Erde**
- (6) Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen**
- (7) Kohlenstoffkreislauf**

**Abb. 9:** Inhaltsübersicht der Lernsoftware.

### **11.1.1 Fachinhalte der Lernaufgaben**

Für die Lernaufgaben innerhalb der Software sind drei Themen ausgewählt worden und zwar der anthropogene Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf (siehe Kapitel 11.1.1.1), die Silikatverwitterung (siehe Kapitel 11.1.1.2 auf Seite 122 f.) und die physikalische Kohlenstoffpumpe (siehe Kapitel 11.1.1.3 auf Seite 123 f.).

#### **11.1.1.1 Fachinhalt der Aufgabe 1: Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf**

Zentraler Inhalt der ersten Lernaufgabe ist der anthropogene Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Klimatische Veränderungen finden in den Medien, in der Politik und in der Wissenschaft starke Beachtung. Das Wissen über den anthropogenen Einfluss stammt nicht aus Erfahrungen. Es ist ein wissenschaftliches Konstrukt computergestützter Modellsimulationen. Diese Berechnungen basieren auf Mess- bzw. Beobachtungsdaten. Sie bedürfen stets einer kritischen Analyse und Interpretation. Innerhalb der ersten Lernaufgabe beschäftigen sich die Schülerinnen und Schüler mit einem Thema von großer gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Bedeutung. Neben der Aktualität des fachlichen Inhalts hat auch die Verwendung computergestützter Modellsimulationen zur Auswahl des Themas geführt.

In der ersten Lernaufgabe geht es ausschließlich um die Erarbeitung von Kohlenstoffflüssen. Diese stellen Stoffflussbeziehungen zwischen bestimmten Elementen des Systems Erde dar. Die erste Lernaufgabe dient als Einstieg in die systemtheoretische Betrachtungsweise. In den beiden folgenden Aufgaben werden neben den Stoffflüssen auch Wirkungsbeziehungen zwischen zentralen Elementen des Systems Kohlenstoffkreislauf analysiert (siehe Kapitel 11.1.1.2 auf Seite 122 f. und 11.1.1.3 auf Seite 123 f.).

Der folgende Abschnitt bildet den Einstieg der ersten Lernaufgabe:

*Zurzeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Die Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?*

Die Schülerinnen und Schüler erhalten zunächst die Aufgabe, sich über den anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf zu informieren. Sie sollen die dargestellten Kohlenstoffspeicher identifizieren und beschreiben. Im Anschluss sollen die Kohlenstoffflüsse bestimmt werden. Dabei ist auf die Differenzierung zwischen den Flussraten und den Prozessen, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen, zu achten. Es schließt sich die Frage an, welche Menge Kohlenstoff im Jahr, durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzt wird und in der Atmosphäre verbleibt. Zudem wird danach gefragt, ob der Ozean und die terrestrische Biosphäre in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke wirken. Abschließend sollen die Lernenden die Folgen der beobachteten Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre auf die Entwicklung der beschriebenen Kohlenstoffflüsse abschätzen.

#### **11.1.1.2 Fachinhalt der Aufgabe 2: Silikatverwitterung**

Die zweite Lernaufgabe gliedert sich in zwei Teilaufgaben. Der erste Abschnitt dient der Erarbeitung spezifischer Kohlenstoffflüsse, der zweite der Analyse bestimmter Wirkungsbeziehungen. Im Gegensatz zur ersten Lernaufgabe umfasst diese Aufgabe damit zwei verschiedene Kategorien von Beziehungen (vgl. Kapitel 11.1.1.3 auf Seite 123 f.).

In der ersten Teilaufgabe sollen sich die Schülerinnen und Schüler zunächst über den langfristigen Kohlenstoffkreislauf informieren. Dabei sollen sie die Kohlenstoffmenge in den vier zentralen Kohlenstoffspeichern Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre ermitteln. Im Anschluss sollen die zwischen den Speichern dargestellten Kohlenstoffflüsse identifiziert werden. Es sollen sowohl die Flussraten als auch die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen, bestimmt werden. Es schließt sich die Frage an, wie viel Kohlenstoff in 100 Jahren aufgrund von Verwitterungsprozessen von der Lithosphäre in die Hydrosphäre und von der Atmosphäre in die Hydrosphäre fließt. Der jeweilige Kohlenstofffluss soll berechnet werden. Dabei soll angenommen werden, dass sich die Flussraten während der kommenden 100 Jahre nicht ändern.

In der zweiten Teilaufgabe sollen Wirkungsbeziehungen analysiert werden, die für das Thema Silikatverwitterung spezifisch sind. Der folgende Abschnitt bildet den Einstieg:

*Zurzeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Prozesse im langfristigen Kohlenstoffkreislauf haben?*

Die Schülerinnen und Schüler erhalten die Aufgabe, sich über die Verwitterung von Silikatgesteinen zu informieren. Mögliche Folgen einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre für die Silikatverwitterung sollen abgeschätzt werden. Die Versuchspersonen sollen die Wirkungsbeziehungen zwischen den Elementen „Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre“, „Temperatur der Atmosphäre“ und „Verwitterung von Silikatgesteinen“ beschreiben. Im Anschluss soll die Frage beantwortet werden, wie sich eine Schwächung oder eine Stärkung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen auf die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auswirken würde.

### **11.1.1.3 Fachinhalt der Aufgabe 3: Physikalische Kohlenstoffpumpe**

Die dritte Lernaufgabe gliedert sich ebenfalls in zwei Teilaufgaben. Der erste Abschnitt dient der Erarbeitung spezifischer Kohlenstoffflüsse, der zweite der Analyse bestimmter Wirkungsbeziehungen. Diese Lernaufgabe umfasst, wie schon die zweite Aufgabe, zwei verschiedene Kategorien von Beziehungen (vgl. Kapitel 11.1.1.2 auf Seite 122 f.).

Der folgende Abschnitt bildet den Einstieg der dritten Lernaufgabe:

*Die physikalische Kohlenstoffpumpe ist für den Kohlenstoffkreislauf im Ozean und den kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf von zentraler Bedeutung. Sie ist vor allem im Nordatlantik aktiv. Dort kommt es zum Absinken gewaltiger Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern. Mit den Wassermassen gelangt gelöster anorganischer Kohlenstoff (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) in die Tiefe. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) wird dem Austausch mit der Atmosphäre für längere Zeit entzogen. Die Tiefenwasserbildung ist Teil eines erdumspannenden Strömungssystems, dem großen marinen Förderband. Das große marine Förderband wird unter anderem durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben, die auf unterschiedliche Temperaturen und unterschiedlichen Salzgehalt zurückzuführen sind. Es wird daher auch als globale thermohaline Zirkulation bezeichnet. Zum Teil ist das Strömungssystem aber auch windgetrieben oder beruht auf Niveauunterschieden des Meeresbodens.*

In der ersten Teilaufgabe sollen sich die Schülerinnen und Schüler zunächst über die physikalische Kohlenstoffpumpe informieren. Die drei Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Oberflächenwasser“ und „Tiefenwasser“ sollen beschrieben und die Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern identifiziert werden. Dabei sind sowohl die Flussraten als auch

die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen, zu berücksichtigen. Im Anschluss wird die Frage nach der Bedeutung der dargestellten Stoffflüsse für den globalen Kohlenstoffkreislauf gefragt. Wirkt der Ozean in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsene?

In der zweiten Lernaufgabe geht es um die Analyse spezifischer Wirkungsbeziehungen. Der folgende Abschnitt bildet den Einstieg in den zweiten Teil der Lernaufgabe:

*Die Effektivität der physikalischen Kohlenstoffpumpe ist abhängig von der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik. Im Zusammenhang mit der beobachteten globalen Erwärmung (Anstieg der globalen Temperatur von 1860 bis 2000 um etwa 0,6°C) stellt sich die Frage nach der Entwicklung der globalen thermohalinen Zirkulation. Welche Wirkung könnte eine weltweite Temperaturerhöhung auf das Verhalten des Strömungssystems haben? Bleibt die gegenwärtige Form der globalen thermohalinen Zirkulation in den nächsten Jahrhunderten stabil? Wird sich die globale thermohaline Zirkulation verstärken oder ist sie im Begriff, zum Erliegen zu kommen?*

Die Schülerinnen und Schüler sollen sich zunächst über die thermohaline Zirkulation informieren. Mögliche Folgen einer globalen Erwärmung für die globale thermohaline Zirkulation sollen abgeschätzt werden. Die Elemente „globale Temperatur“, „Verdunstung in den Subtropen“, „Niederschlag über dem Nordatlantik“, „Wasserdampftransport vom Atlantik zum Pazifik“, „Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik“, Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik“ und „thermohaline Zirkulation“ sollen beschrieben und die wichtigen Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen identifiziert werden. Es schließt sich die Frage an, welche Wirkung eine globale Erwärmung auf das Verhalten der globalen thermohalinen Zirkulation haben kann.

## **11.2 Struktur der Lernumgebung**

Die Lernumgebung setzt sich aus der eigentlichen Lernsoftware und Begleitbögen zusammen. Letztere enthalten eine Bedienungsanleitung, die den Einstieg in die Nutzung der Software erleichtert. Die Begleitbögen werden den Schülerinnen und Schülern direkt vor ihrer Arbeit mit der Lernsoftware in Form von DIN-A4-Bögen ausgehändigt (siehe Anhang A.3 auf Seite 321 f.). Da auf den Computertischen in Schulen der Platz vor der Tastatur zumeist sehr gering ist, sind die Begleitbögen im Querformat gestaltet. Die Erklärung der Bedienelemente ist bewusst nicht in die Lernsoftware integriert: Die externe Darreichung soll einer etwaigen Überforderung durch eine komplexere Bedienungsfläche entgegenwirken.

Die eigentliche Lernsoftware besitzt Hypertext-Struktur. Hypertexte bestehen aus einzelnen Text-Teilen, die über Querverweise, so genannte (Hyper-)Links, miteinander verknüpft sind. Die Struktur der Verbindungen zwischen ausgewählten Text-Teilen basiert auf didaktischen Überlegungen der Autorin. Je nach Verbindungsstruktur ergeben sich im einfachsten Fall lineare und unterschiedlich stark vernetzte Hypertexte, wobei stärker vernetzte von größerem Interesse sind (siehe Kapitel 5.3 auf Seite 79 ff). Die Schülerinnen und Schüler können einzelne Informationen über viele verschiedene Wege und von vielen verschiedenen Stellen erreichen. Sie entscheiden selbst, was sie wann und in welcher Reihenfolge lesen.

Die Lernsoftware gliedert sich in zwei Teile, einen Informationsteil und einen Aufgabenteil. Die enthaltenen fachlichen Inhalte sind in Kapitel 11.1 auf Seite 119 ff. dargestellt (siehe auch Anhang A.1 auf Seite 288 ff.). Es existieren zwei Versionen des Informationsteils. Die eine Version enthält zusätzlich zu den allgemeinen Themen uniperspektivische, die andere zweiperspektivische Zusatzinformationen. Textumfang und Schwierigkeitsgrad unterscheiden sich bei den beiden Versionen nicht. Die inhaltliche Differenzierung der Lernumgebung wird in Kapitel 11.4.1 auf Seite 138 ff. vorgestellt.

Der Aufgabenteil enthält drei Lernaufgaben. Diese beziehen sich jeweils auf einen Teilaspekt des Systems Kohlenstoffkreislauf. Die fachlichen Inhalte der drei Aufgaben sind in Kapitel 11.1.1 auf Seite 121 ff. dargestellt. Es existieren drei Versionen des Aufgabenteils. Die erste Version verzichtet auf den Einsatz systemischer Darstellungsformen, die zweite präsentiert den Versuchspersonen fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme, die dritte leitet die Schülerinnen und Schüler zur aktiven Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen an. Die strukturelle und designspezifische Differenzierung der Lernumgebung ist in Kapitel 11.4.2 auf Seite 140 ff. dargestellt. Wie schon bei den Begleitbögen, musste auch bezüglich des Aufgabenteils entschieden werden, ob die Lernaufgaben in die Software integriert oder extern in Form von Arbeitsbögen präsentiert werden sollen. Das Einfügen der Aufgaben in die Software führt zu einer komplexeren Bedienungsoberfläche. Bei der computergestützten Eingabe der Lösungen kann es deshalb zu höherer kognitiver Belastung kommen. Es überwiegen jedoch die Vorteile. Im Rahmen der Lernsitzen konstruieren einige Schülerinnen und Schüler eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme. Eine computergestützte Eingabe dieser systemischen Darstellungsformen ist von Vorteil. Die Diagramme können in jedem Stadium der Bearbeitung beliebig verändert werden (vgl. Schanze & Brückner, 2005), indem einzelne Komponenten eingefügt oder wieder entfernt werden. Zudem kann die Lage einzelner Komponenten variiert werden. Eine externe Zeichenfläche auf einem begleitenden Arbeitsbogen bietet diese Möglichkeiten nicht. Handschriftliche Änderungen würden die konstruierten Fluss- und Wirkungsdiagramme schnell unübersichtlich machen. Die Beantwortung der Fragen erfolgt daher bei allen drei Softwareversionen durch Eingabe in den Computer.

Der Einsatz der Software beginnt mit dem Austeilen der Begleitbögen. Im Anschluss wird das Lernprogramm gestartet. Über eine Startseite (siehe Kapitel 11.3.1 auf Seite 126 f.) gelangen die Versuchspersonen zum Informationsteil (siehe Kapitel 11.3.2 auf Seite 127 ff.). Die Schülerinnen und Schüler öffnen über den Button „Aufgabe“ die erste Lernaufgabe (siehe Kapitel 11.3.3 auf Seite 132 ff. und Kapitel 11.4.2 auf Seite 140 ff.). Es besteht nun permanent die Möglichkeit, zwischen den Informationsseiten und den Aufgabenseiten zu wechseln. Innerhalb der Aufgabenseiten beantworten die Versuchspersonen schriftlich die jeweilige Lernaufgabe. Dabei orientieren sich die Schülerinnen und Schüler an der detaillierten Aufgabenstellung und nutzen die Texte und Bilder der Informationsseiten. Ist eine Aufgabe abschließend bearbeitet, öffnet die Versuchsperson über den Button „Lösung“ am Ende der Aufgabenstellung eine Beispiellösung. Sie haben nun die Möglichkeit ihre eigene Antwort mit diesem Lösungsvorschlag zu vergleichen. Abschließend wird das Programm durch die Speicherung eines im Hintergrund aufgezeichneten Lernprotokolls beendet. Entsprechend der drei Lernaufgaben (siehe Kapitel 11.1.1 auf Seite 121 ff.), wird die Software dreimal eingesetzt. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten in drei aufeinander folgenden Lernsituationen jeweils eine der Aufgaben. Dabei ist die Reihenfolge der Lernaufgaben vorgegeben. Der zeitliche Ablauf der Studie wird in Kapitel 10.2.4 auf Seite 101 genauer beschrieben.

### **11.3 Design der Lernumgebung**

#### **11.3.1 Startseite**

Auf der Startseite tragen die Versuchspersonen den Code für die jeweilige Lernsituation (L1, L2 bzw. L3 für die Lernsituation eins, zwei bzw. drei) und ihren Benutzernamen in ein Textfeld ein (siehe Abb. 10 auf Seite 127). Der Benutzername dient der eindeutigen Zuordnung der Fragebögen zu den Lernprotokollen und der Fragebögen des Vortests zu denen des Nachtests bei gleichzeitiger Wahrung der Anonymität. Er ergibt sich aus dem Anfangsbuchstaben des Vornamens der Mutter und dem des Vornamens des Vaters, sowie aus dem Geburtstag der Mutter. Eine Versuchsperson, die an der ersten Lernsituation teilnimmt, deren Mutter Elke und deren Vater Jochen heißt und deren Mutter am 17. Februar Geburtstag hat, gibt in das Textfeld L1EJ1702 ein. Im Anschluss an die Eingabe des Codes und des Benutzernamens kann die Lernsituation durch anklicken des Startbuttons beginnen. Auf der Startseite können über den Button „beenden“ auch Zwischenspeicherungen vorgenommen werden. Zudem kann das Lernprogramm über diesen Button geschlossen werden (siehe Kapitel 11.3.4 auf Seite 136 ff.).



**Abb. 10:** Startseite der Lernsoftware.

### 11.3.2 Informationsseiten

Die Hauptseiten des Lernprogramms setzen sich aus fünf Elementen zusammen: Inhaltsfenster, Textfeld, Vorschau bild, Thumbnails und Menüleiste (siehe Abb. 11 auf Seite 128).

#### Inhaltsfenster

Das Inhaltsfenster auf der oberen linken Seite dient der Übersicht über die Kapitel der Anwendung. Mit „+“ gekennzeichnete Kapitel haben Unterkapitel. Wird ein Kapitel durch Anklicken geöffnet, werden zugehörige Unterkapitel aufgeklappt. Bereits erschienene Unterkapitel eines zuvor angezeigten Kapitels werden gleichzeitig zugeklappt. Beim Anklicken eines Kapitels öffnen sich im Textfeld auf der rechten Seite der spezifische Lerntext und im Bildbereich auf der unteren linken Seite die spezifischen Abbildungen. Im Inhaltsfenster ist das im Textfeld angezeigte Kapitel blau markiert. Ist ein Unterkapitel in weitere Abschnitte unterteilt, so werden diese durch Überschriften oberhalb des Textes im Textfeld auf der rechten Seite angezeigt. Durch Anklicken dieser Überschriften wird die entsprechende Textpassage im Textfeld angezeigt. Man erreicht jedoch auch über den Scrollbalken am äußeren rechten Rand die weiter unten aufgeführten Textpassagen.

## Vorschaubild

Im Vorschaufenster werden die Abbildungen, die zu einem ausgewählten Kapitel gehören, vergrößert angezeigt. Das Vorschaubild ist mit einem Textbutton in der Farbe Orange ausgestattet, um den zu einem Bild gehörenden Absatz im Textfeld auf der rechten Seite zu sehen (siehe Abb. 11 auf Seite 128). Das Vorschaubild kann durch anklicken zu einem Vollbild vergrößert werden (siehe Abb. 13 auf Seite 130). Ein Button am rechten unteren Bildschirmrand dient dazu, die zuvor angezeigte Informationsseite aufzurufen. Die Vollbildansicht nimmt fast die gesamte Oberfläche der Software ein. Die Funktionen innerhalb der Menüleiste bleiben jedoch erhalten.

**Inhaltsfenster**

**Das Vorschaubild kann zum Vollbild vergrößert werden**

**Mit Hilfe der Thumbnails können Bilder zum Vorschaubild vergrößert werden**

**Menüleiste mit Startseite-, Index-, Glossar-, Aufgaben- und Vor und zurück-Button**

**Textfeld**

Ist ein Unterkapitel in weitere Abschnitte unterteilt so werden diese durch Überschriften oberhalb des Textes angezeigt. Wird eine dieser Überschriften angeklickt gelangt man zu des entsprechenden Textstelle.

**Mit Hilfe des Textsymbols kann man den zum Bild gehörenden Text im Textfeld auf der rechten Seite anzeigen lassen**

**Blau und unterstrichen gesetzte Begriffe sind Links zu anderen Kapiteln**

**Blau und kursiv gesetzte Begriffe sind Glossarbegriffe**

**Mit Hilfe des Bildsymbols kann das zum Text gehörende Bild als Vorschaubild anzeigen werden**

Abb. 11: Seitenübersicht der Lernsoftware.



## Thumbnails

In der Leiste unterhalb des Vorschaubildes werden alle Abbildungen, die zu einem angezeigten Kapitel zur Verfügung stehen mit so genannten „Thumbnails“ aufgeführt. Dabei handelt es sich um miniaturisierte Vorschaubilder des Originals. Durch Aktivierung eines Thumbnails wird die Abbildung im Vorschaufenster vergrößert angezeigt.

## Textfeld

Im Textfeld werden Lerntexte angezeigt. Blau und kursiv gesetzte Begriffe sind Glossar-begriffe. Per Mausklick wird eine Definition des Begriffs im Glossar aufgerufen (siehe Abb. 12 auf Seite 130). Blau und unterstrichen gesetzte Begriffe sind so genannte Links zu anderen Kapiteln. Per Mausklick kann das entsprechende Kapitel geöffnet werden. Die im Textfeld angezeigten Lerntexte enthalten Bildbuttons in der Farbe Orange. Diese dienen dem Anzeigen der zum jeweiligen Absatz gehörenden Abbildung im Vorschaufenster unten links.

## Menüleiste

Die Menüleiste beinhaltet die Buttons *Startseite*, *Index*, *Glossar*, *Aufgabe* und *Vor-und-Zurück*. Durch Aktivierung des Startbuttons gelang man zurück zur Startseite. Von dort können Zwischenspeicherungen durchgeführt werden. Zudem kann das Programm über die Startseite beendet werden (siehe Kapitel 11.3.4 auf Seite 136 ff.) Über den Indexbutton gelangt der Lernende zur Indexfunktion (siehe Abb. 14 auf Seite 131). In einer alphabetischen Stichwortliste können Inhalte gesucht und entsprechende Kapitel direkt angewählt werden. Der Glossarbutton führt zu einem Glossarfenster, in dem Fachbegriffe erklärt werden (siehe Abb. 12 auf Seite 130). In das Feld *Suchbegriff* können Begriffe direkt eingegeben werden. Zudem können Begriffe über eine alphabetisch sortierte Liste ausgewählt werden. Über den Aufgabenbutton erreichen die Schülerinnen und Schüler die Aufgaben-seite mit den für die Lernsitzen und Lerngruppen spezifischen Aufgaben und Lösungen. Die Differenzierung der Lernumgebungen wird in Kapitel 11.4 auf Seite 138 ff. dargestellt. Mit dem *Zurück*-Button gelangen die Schülerinnen und Schüler zur zuletzt eingesehenen Seite. Sind sie einen Schritt zurückgegangen, dient der *Vor*-Button anschließend dazu zur Ausgangsseite zurückzukehren.

Die Suche von Begriffen erfolgt über die direkte Eingabe oder die alphabetische Sortierung

Anzeige der Suchbegriffe

Anzeige der Erklärung eines Suchbegriffs

Mit Hilfe des Buttons der Menüleiste kann das Glossar direkt aufgerufen werden

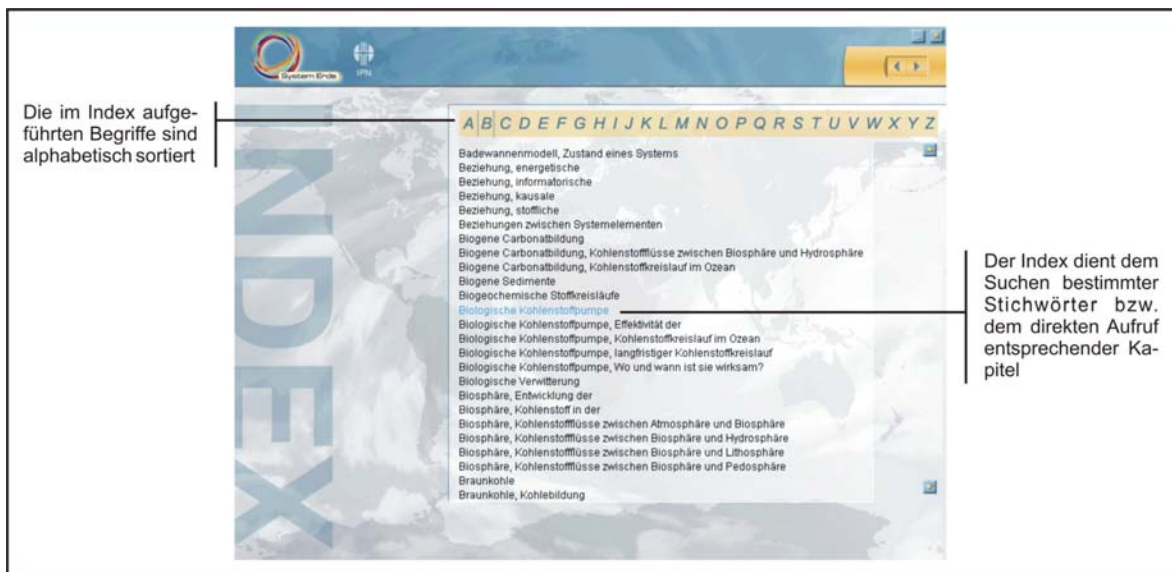
Blau und kursiv gesetzte Begriffe sind **Glossarbegriffe**: Per Klick wird eine Erklärung des Begriffs im Glossar aufgerufen

Abb. 12: Glossarfunktion der Lernsoftware.

Ein Vorschaubild kann zum **Vollbild** vergrößert werden

Mit Hilfe dieses Buttons wird die zuvor angezeigte zur Abbildung gehörende Textseite wieder aufgerufen

Abb. 13: Vollbildfunktion der Lernsoftware.



**Abb. 14:** Indexfunktion der Lernsoftware.

## Vertiefungstexte

Einige Kapitel enthalten zwei Vertiefungstexte. Diese sind in der Inhaltsübersicht mit dem Zusatz *Extra 1* bzw. *Extra 2* gekennzeichnet (siehe Abb. 15 auf Seite 132) und können durch anklicken im Textfeld angezeigt werden. Zudem enthalten Kapitel, die Vertiefungstexte besitzen, am rechten oberen Rand des Textfeldes zwei Buttons zur direkten Anwahl der Zusatzinformationen (siehe Abb. 15 auf Seite 132). Die Vertiefungstexte sind je nach Lerngruppe uni-perspektivisch oder zwei-perspektivisch gestaltet. Eine inhaltliche Differenzierung der Lernumgebungen ist in Kapitel 11.4.1 auf Seite 138 ff. dargestellt.

**Vertiefungstexte** sind im Inhaltsfenster mit dem Zusatz **EXTRA** gekennzeichnet und können per Klick im Textfeld angezeigt werden

Enthält ein Kapitel **Vertiefungstexte**, können diese mit Hilfe der Buttons direkt aufgerufen werden

Wird ein **Vertiefungstext** im Textfenster angezeigt ist dieser im Inhaltsfenster farbig markiert

**Vertiefungstexte** sind mit dem Zusatz **EXTRA** gekennzeichnet

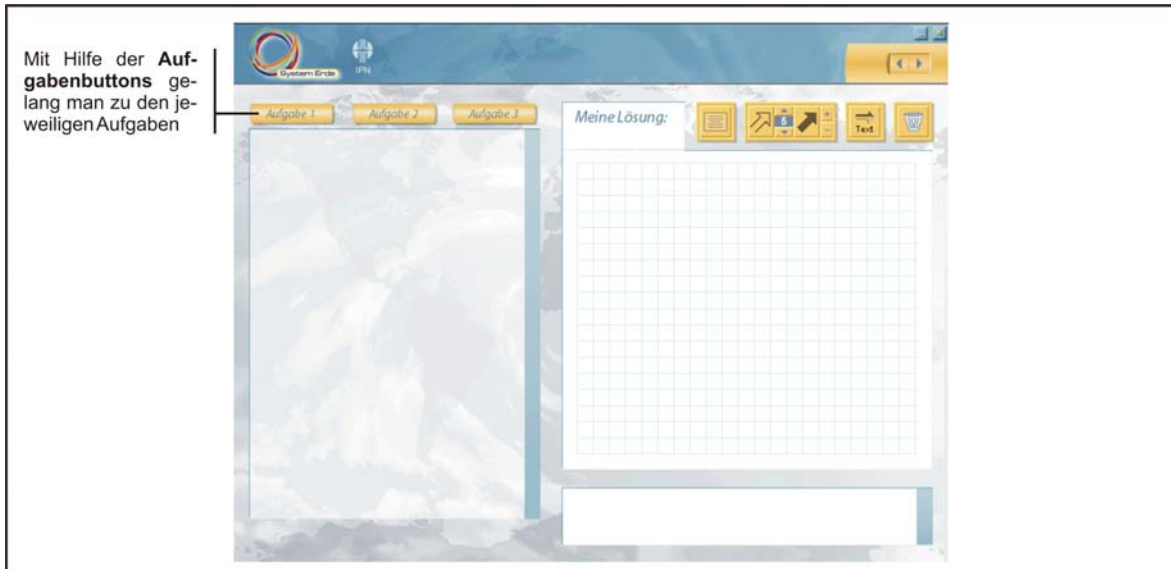
Zwischen jeweils zwei **Vertiefungstexten** kann mit Hilfe der Buttons gewechselt werden

Abb. 15: Vertiefungstexte der Lernsoftware.

### 11.3.3 Aufgabenseiten

Die Aufgabenseiten werden über den Button *Aufgabe* in der Menüleiste der Lernsoftware geöffnet (siehe Abb. 11 auf Seite 128). Sie enthalten drei Aufgaben und deren Beispiellösungen. Zudem bieten sie den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, ihre Lösungen computergestützt zu erstellen. Je nach Lernumgebung sind die Aufgaben selbst und die Eingabeoptionen der zu erstellenden Lösungen unterschiedlich gestaltet. Es existieren drei Versionen des Aufgabenteils. Eine Version verzichtet auf den Einsatz systemischer Darstellungsformen, eine andere präsentiert den Schülerinnen und Schülern fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme. Zudem existiert eine Version, die zur aktiven Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen anleitet. Die verschiedenen Softwareversionen sind in

Kapitel 11.4.2 ab Seite 140 ff. dargestellt. Einige Bedienelemente sind jedoch stets vorhanden. Mit Hilfe der Buttons *Aufgabe 1*, *Aufgabe 2* und *Aufgabe 3* gelangen die Schülerinnen und Schüler zu den jeweiligen Aufgaben (siehe Abb. 16).



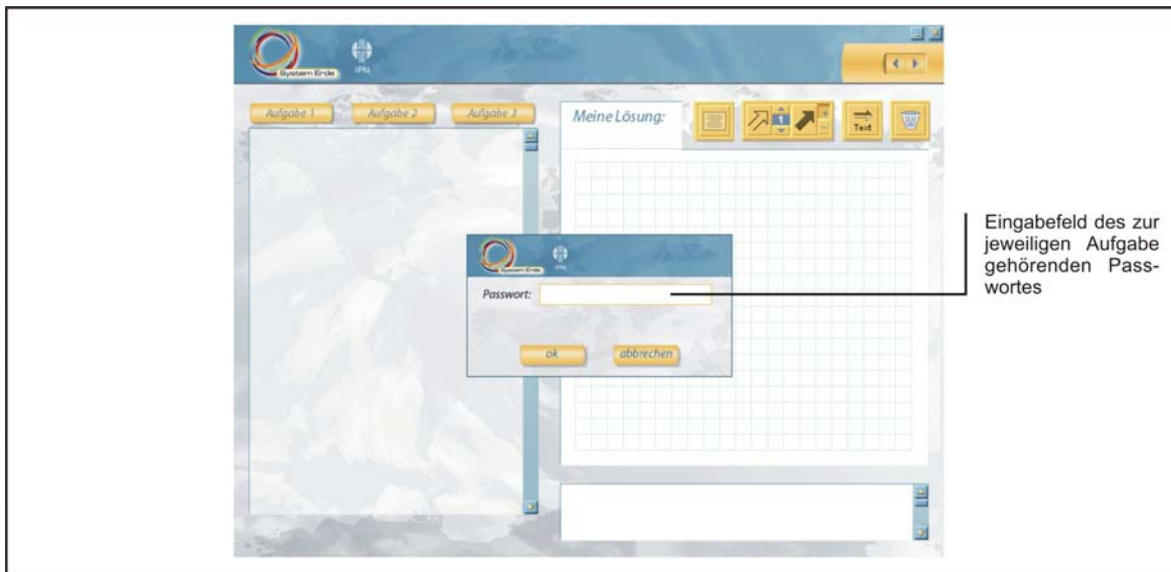
**Abb. 16:** Beispiel für eine Aufgabenseite mit Aufgabenauswahlmöglichkeit (Beispiel aus den Lernumgebungen C 1 und C 2).

Bevor eine Aufgabe angezeigt wird, muss jedoch ein spezifisches Passwort<sup>43</sup> eingegeben werden (siehe Abb. 17 auf Seite 134). Dieses wird den Versuchspersonen zu Beginn der jeweiligen Lernsitzung bekannt gegeben. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass alle Schülerinnen und Schüler die drei Aufgaben in der richtigen Reihenfolge und unter den gleichen Zeitvorgaben bearbeiten. Während einer Lernsitzung kann permanent zwischen den Informationsseiten und den Aufgabenseiten gewechselt werden. Die Aufgabenseite kann über den *Zurück*-Button in der Menüleiste verlassen werden. Die Versuchsperson gelangt zu der zuletzt angezeigten Informationsseite. Die Aufgabenseite wird wieder über die Aktivierung des Aufgabenbuttons in der Menüleiste angezeigt.

---

<sup>43</sup> Die Passwörter für die Aufgaben lauten „Wasser24KH“ (Aufgabe 1), „SE06Algen“ (Aufgabe 2) und „KaribikK103“ (Aufgabe 3). Bei der Eingabe der Passwörter ist auf Groß- und Kleinschreibung zu achten.



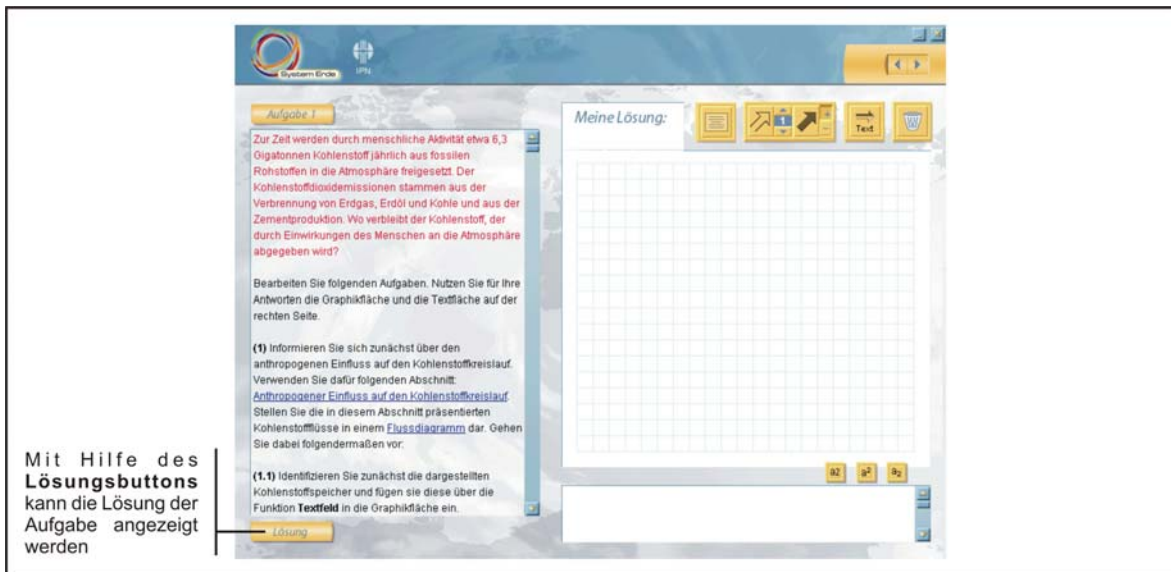


**Abb. 17:** Beispiel für eine Aufgabenseite mit angezeigter Passworteingabefunktion zum Öffnen einer Aufgabe (Beispiel aus den Lernumgebungen C 1 und C 2).

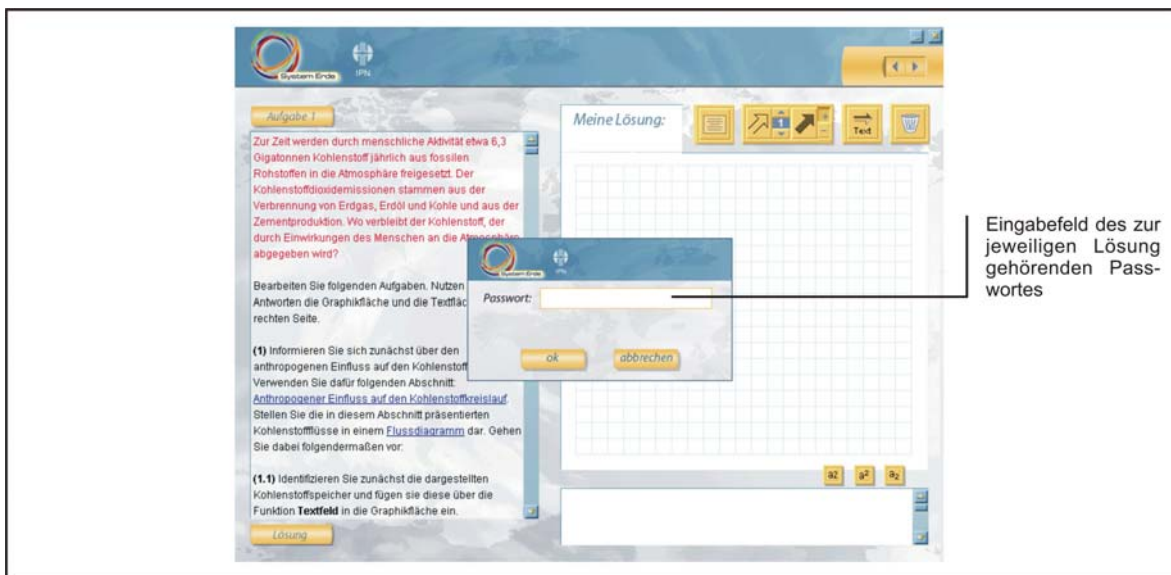
Zu jeder Aufgabe existiert eine Beispiellösung. Die Schülerinnen und Schülern können gegen Ende einer Lernsitzung mit Hilfe eines Lösungsbuttons am linken unteren Bildschirmrand die jeweiligen Lösungsbeispiele einsehen und mit ihrer eigenen Aufgabenlösung vergleichen (siehe Abb. 18 auf Seite 135). Um sicherzustellen, dass alle Versuchspersonen gleich viel Zeit mit der Bearbeitung der Aufgabe und der Beispiellösung verbringen, wurde eine zweite Passworteingabefunktion eingerichtet (siehe Abb. 19 auf Seite 135). Die Lösungsbeispiele können nur mit Hilfe eines Passwortes<sup>44</sup> geöffnet werden. Dieses wird den Schülerinnen und Schülern erst zehn Minuten vor dem Ende einer Lernsitzung bekannt gegeben. Der zeitliche Ablauf der Studie wird in Kapitel 10.2.4 auf Seite 101 genauer beschrieben.

---

<sup>44</sup> Die Passwörter für die Beispiellösungen lauten „ASV02Bermudas“ (Lösung von Aufgabe 1), „EJKorallen30“ (Lösung von Aufgabe 2) und „PeterVD96“ (Lösung von Aufgabe 3). Bei der Eingabe der Passwörter ist auf Groß- und Kleinschreibung zu achten.



**Abb. 18:** Beispiel für eine Aufgabenseite mit Beispiellösungsfunktion (Beispiel aus den Lernumgebungen C 1 und C 2).



**Abb. 19:** Beispiel für eine Aufgabenseite mit angezeigter Passworteingabefunktion zum Öffnen einer Beispiellösung (Beispiel aus den Lernumgebungen C 1 und C 2).

### 11.3.4 Beendigung der Arbeit mit der Lernsoftware

Die Arbeit mit der Lernsoftware kann mit Hilfe eines Buttons am rechten oberen Bildschirmrand beendet werden (siehe Abb. 20). Der Button *beenden* auf der Startseite bietet ebenfalls die Möglichkeit, das Programm zu schließen (siehe Abb. 10 auf Seite 127). Die Startseite wird durch Aktivierung des Startbuttons in der Menüleiste aufgerufen. Es besteht zudem die Möglichkeit, die Lernsoftware zu minimieren. Die sichtbare Oberfläche der Software reduziert sich auf ein Symbol in der Microsoft-Windows-Taskleiste am unteren Bildschirmrand. Durch Aktivierung dieses Symbols wird die gesamte Softwareoberfläche wieder angezeigt. Die Minimierungsfunktion befindet sich am rechten oberen Bildschirmrand (siehe Abb. 20). In den Lernsituationen der Studie ist sie nicht verwendet worden. Die Schülerinnen und Schüler haben vorgegebene Zeiträume mit der Lernsoftware gearbeitet. Unterbrechungen innerhalb einer Lernsituation sind nicht vorgekommen. Die Minimierungsfunktion kann aber bei zukünftigen Einsätzen der Software von Nutzen sein, denn mit ihr kann zwischen dem Lernprogramm und anderer Software beliebig gewechselt werden.

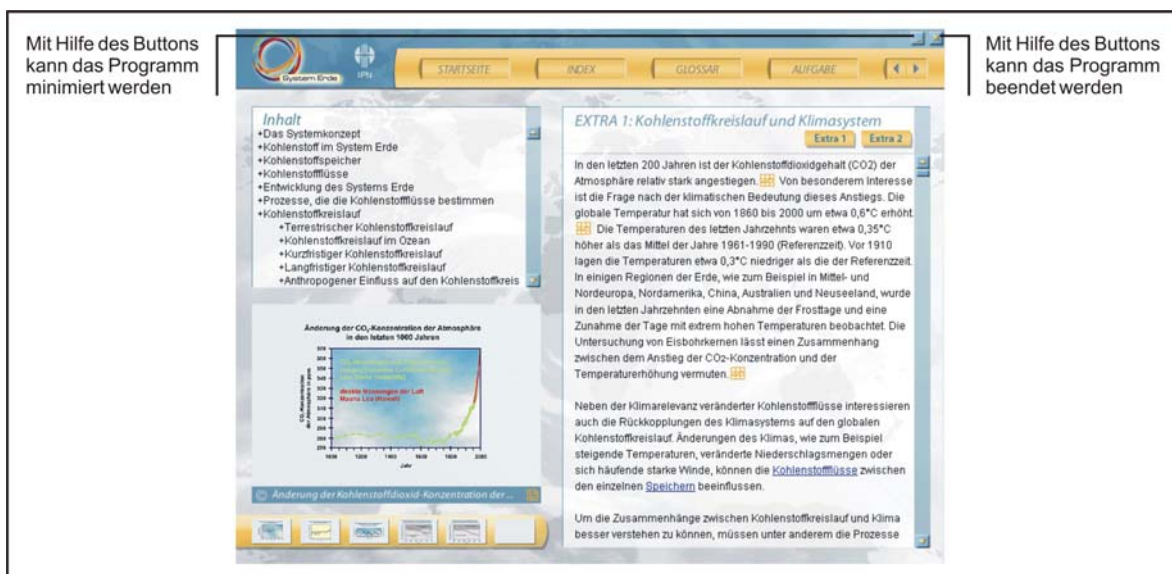


Abb. 20: Beendigungsfunktion der Lernsoftware.

Wird eine der Beendigungsfunktionen der Lernsoftware aktiviert, erscheint auf dem Bildschirm ein Kontrollfenster (siehe Abb. 21 auf Seite 137). Mit Hilfe der Buttons *ja* und *nein* kann zwischen der Weiterbearbeitung und der Beendigung des Programms gewählt werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass es nicht zu einem versehentlichen Ende des Softwareeinsatzes kommt. Wird die Frage *Wollen Sie das Programm „Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde“ wirklich beenden?* mit „ja“ beantwortet, erscheint ein Fenster mit Speicheroptionen (siehe Abb. 22 auf Seite 138). Während einer Lernsituation



werden die Aktivitäten einer Versuchsperson in Form eines Lernprotokolls aufgezeichnet. Dieses gibt an, wie lange auf einzelnen Seiten verweilt wird und in welcher Reihenfolge Bedienungsfunktionen zum Einsatz kommen. Zudem beinhalten sie die erstellte Aufgabenlösung inklusive ihres Entstehungsprozesses. Neben der Lösung selbst werden also auch die Veränderungen der Lösung während der Lernsitzung aufgezeichnet. Jedes Lernprotokoll wird unter einem spezifischen Code für die jeweilige Lernsitzung (L1, L2 bzw. L3 für die Lernsitzung eins, zwei bzw. drei) und dem Benutzernamen der Versuchsperson gespeichert. Der Dateiname entspricht der auf der Startseite eingegebenen persönlichen Kennziffer (siehe Kapitel 11.3.1 auf Seite 126). Er wird in ein Eingabefeld im Speicherfenster eingetragen (siehe Abb. 22 auf Seite 138). Innerhalb eines Auswahlfeldes kann der Ordner bestimmt werden, indem die Datei gespeichert werden soll. Es stehen die Ordner *Lernsitzung 1*, *Lernsitzung 2* und *Lernsitzung 3* zur Verfügung. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass nur Daten von Schülerinnen und Schülern, die die Lernumgebung wie geplant genutzt haben, bei der Auswertung berücksichtigt werden.

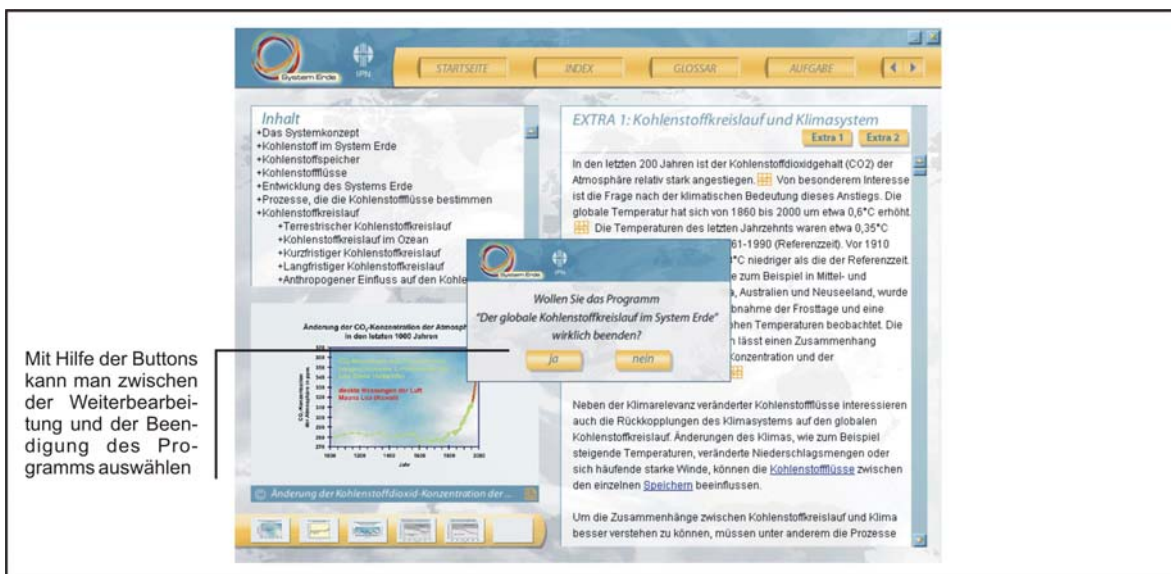


Abb. 21: Kontrollfunktion bei der Beendigung der Lernsoftware.

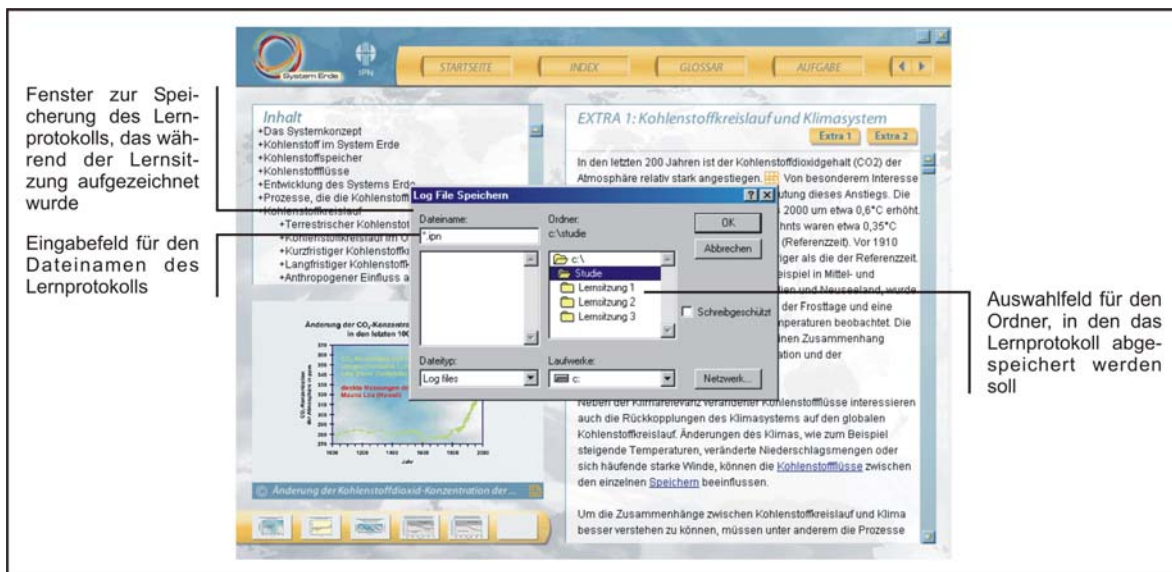


Abb. 22: Speicherfunktion der Lernsoftware.

## 11.4 Differenzierung der Lernumgebung

Es existieren sechs Versionen der Lernsoftware: Version *A 1*, Version *A 2*, Version *B 1*, Version *B 2*, Version *C 1* und Version *C 2*. Die fachinhaltliche Differenzierung ist in Kapitel 11.4.1 auf Seite 138 ff. dargestellt. Die strukturellen und designspezifischen Unterschiede werden in Kapitel 11.4.2 auf Seite 140 ff. beschrieben.

### 11.4.1 Fachinhaltliche Differenzierung

Die Lernumgebungen *A 1*, *B 1* und *C 1* unterscheiden sich inhaltlich von den Programmen *A 2*, *B 2* und *C 2*. Softwareversionen mit dem Zusatz „1“ sind auf der Ebene der Vertiefungstexte (siehe Kapitel 11.3.2 auf Seite 127 ff.) uni-perspektivisch gestaltet. Versionen mit dem Zusatz „2“ sind zwei-perspektivisch konzipiert. Der übrige Informationsteil ist bei allen sechs Programmen identisch.

Die Vertiefungstexte sind für die Bearbeitung der Lernaufgaben von Bedeutung. Sie präsentieren den Schülerinnen und Schülern Zusatzinformationen über die in den Aufgaben angesprochenen spezifischen Aspekte des Systems Kohlenstoffkreislauf. Zu jeder der drei Aufgaben (siehe Kapitel 11.1.1 auf Seite 121 ff. und Anhang A.2 auf Seite 292 ff.) existieren zwei spezifische Vertiefungstexte. Je Aufgabe ist einer der beiden Vertiefungstexte sowohl in den Versionen *A 1*, *B 1* und *C 1*, als auch in den Versionen *A 2*, *B 2* und *C 2*, enthalten. Dieser Text ist innerhalb der Lernsoftware mit *Extra 1* gekennzeichnet (siehe Abb. 15 auf Seite 132). Die Programme mit dem Zusatz „1“ und die mit dem Zusatz „2“

unterscheiden sich also nur in Bezug auf den zweiten Vertiefungstext. Die Unterschiede beziehen sich jedoch ausschließlich auf die dargestellten Inhalte. Umfang und Schwierigkeitsgrad der Texte sind identisch. Innerhalb der Software sind die zweiten Vertiefungstexte mit dem Zusatz *Extra 2* gekennzeichnet.

Die erste Lernaufgabe beschäftigt sich mit dem anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Alle sechs Softwareversionen enthalten den Vertiefungstext *Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem (Extra 1)*. Die zweite Lernaufgabe thematisiert die Silikatverwitterung im Rahmen des langfristigen Kohlenstoffkreislaufs. Sowohl die Lernumgebung *A 1, B 1* und *C 1*, als auch die Lernumgebungen *A 2, B 2* und *C 2*, beinhalten den Vertiefungstext *Silikatverwitterung (Extra 1)*. Die dritte Lernaufgabe beschäftigt sich mit der physikalischen Kohlenstoffpumpe im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs im Ozean. In allen sechs Versionen ist der Vertiefungstext mit dem Titel *Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima (Extra 1)* enthalten.

#### **11.4.1.1 Lernumgebungen A 1, B 1 und C 1**

Die Lernumgebungen *A 1, B 1* und *C 1* sind uni-perspektivisch gestaltet. Im zweiten Vertiefungstext wird der fachliche Inhalt des ersten Vertiefungstextes nicht aus einer anderen Perspektive betrachtet und nicht auf einen anderen Kontext bezogen. Es ist lediglich eine andere Darstellung der Informationen. Zur Bearbeitung der ersten Lernaufgabe enthalten die Softwareversionen *A 1, B 1* und *C 1* neben dem Vertiefungstext *Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem (Extra 1)*, den Vertiefungstext *Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf (Extra 2)*. Im Zusammenhang mit Lösung der zweiten Lernaufgabe soll sowohl die Zusatzinformation *Silikatverwitterung (Extra 1)* als auch der Text mit dem Titel *Chemische Verwitterung und tropisches Klima (Extra 2)* genutzt werden. Der Lösungsprozess der dritten Lernaufgaben wird durch die Informationen innerhalb der Vertiefungstexte *Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima (Extra 1)* und *Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit (Extra 2)* unterstützt.

#### **11.4.1.2 Lernumgebungen A 2, B 2 und C 2**

Die Lernumgebungen *A 2, B 2* und *C 2* sind zwei-perspektivisch gestaltet. Innerhalb des zweiten Vertiefungstextes werden die zentralen Informationen des ersten Textes aus einer anderen Perspektive dargestellt. Zudem beziehen sich die fachlichen Inhalte auf einen anderen Kontext. Beim Lösen der ersten Lernaufgabe sollen die Schülerinnen und Schüler der Lerngruppen *A 2, B 2* und *C 2* neben dem Vertiefungstext *Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem (Extra 1)* den Text *Produktion von Zement (Extra 2)* nutzen. Die zweite Aufgabe soll sowohl unter Verwendung des Textes *Silikatverwitterung (Extra 1)* als auch des

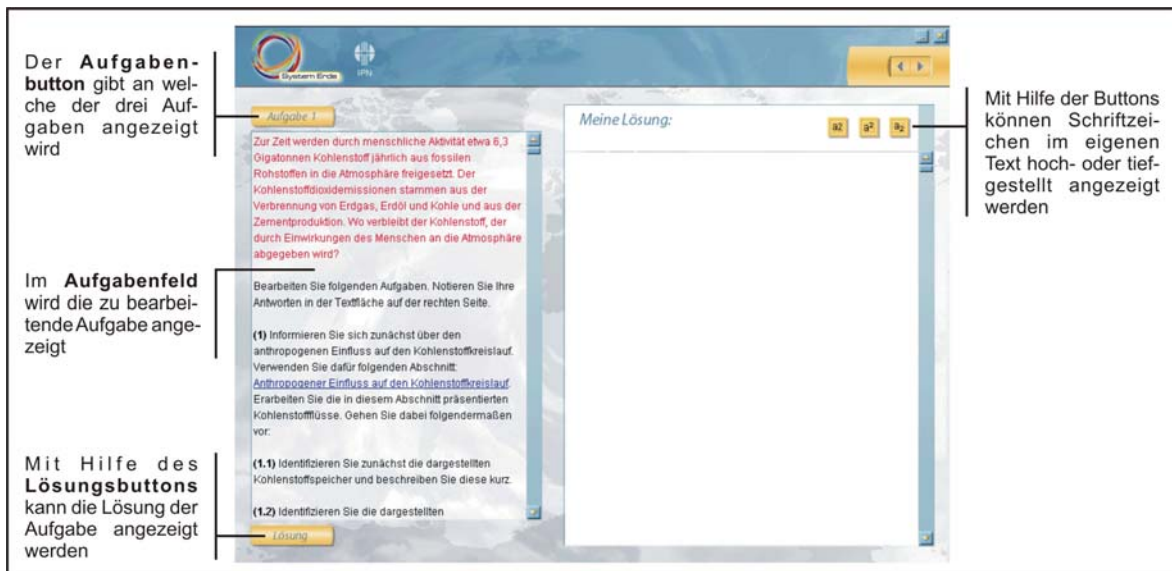
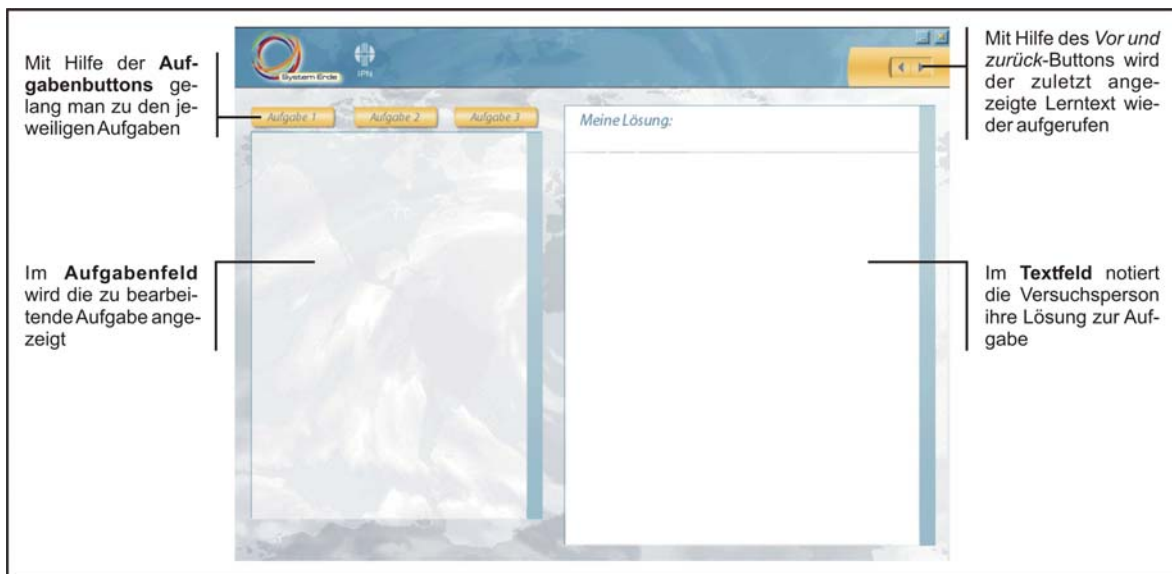
Textes *Silikatverwitterung und Kalkbildung (Extra 2)* bearbeitet werden. Im Zusammenhang mit der dritten Lernaufgabe werden die Zusatzinformationen *Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima (Extra 1)* und *Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport (Extra 2)* eingesetzt.

## **11.4.2 Strukturelle und designspezifische Differenzierung**

Die Lernumgebungen unterscheiden sich strukturell und designspezifisch ausschließlich auf der Ebene der Aufgabenseiten. Grundlegende Eigenschaften dieser Seiten sind in Kapitel 11.3.3 auf Seite 132 ff. dargestellt. Es existieren drei Versionen des Aufgabenteils. Die erste Version verzichtet auf den Einsatz systemischer Darstellungsformen. Sie wird sowohl in der Lernumgebung *A 1* als auch in der Lernumgebung *A 2* verwendet (siehe Kapitel 11.4.2.1). Die zweite Version beinhaltet fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme. Sie kommt bei den Programmen *B 1* und *B 2* zum Einsatz (siehe Kapitel 11.4.2.2 auf Seite 142 ff.). Die dritte Version unterstützt die aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagramme. Sie ist in den Lernumgebungen *C 1* und *C 2* enthalten (siehe Kapitel 11.4.2.3 auf Seite 144 ff.).

### **11.4.2.1 Lernumgebungen *A 1* und *A 2***

Innerhalb der Lernumgebungen *A 1* und *A 2* werden Aufgaben ohne den Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen bearbeitet. Die Aufgabenseiten gliedern sich grob in zwei Teile, ein Aufgabenfeld und ein Textfeld (siehe Abb. 23 auf Seite 141). Auf der linken Bildschirmhälfte wird das Aufgabenfeld, auf der rechten das Textfeld angezeigt. Mit Hilfe der Aufgabenbuttons oberhalb des Aufgabenfeldes können die jeweiligen Lernaufgaben im Aufgabenfeld angezeigt werden. Ein Button rechts über dem Aufgabenfeld gibt an, welche der drei Aufgaben geöffnet ist. In das Textfeld auf der rechten Bildschirmhälfte tragen die Schülerinnen und Schüler ihre Aufgabenlösung ein. Mit Hilfe des *Zurück*-Buttons in der Menüleiste können die Informationsseiten angezeigt werden. Diese enthalten die fachlichen Inhalte, die für die Bearbeitung der Aufgaben notwendig sind. Zudem sind innerhalb des Aufgabentextes so genannte Links eingefügt, die auf bestimmte Inhalte verweisen. Diese Links sind in der Farbe Blau und unterstrichen gesetzt. Bei Aktivierung werden die jeweiligen Informationsseiten direkt angezeigt. Insbesondere wird im Aufgabentext auf die spezifischen Vertiefungstexte verwiesen (siehe 11.4.1 auf Seite 138 ff.).



**Abb. 23:** Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen A 1 und A 2 „ohne Diagramme“.

Im Anschluss an die Lösung der Aufgabe kann mit Hilfe des Lösungsbuttons am linken unteren Bildschirmrand eine Beispiellösung im Aufgaben- bzw. Lösungsfeld angezeigt werden (siehe Abb. 24 auf Seite 142). Die Schülerinnen und Schüler können diese Lösung mit ihrer eigenen, die auf der rechten Bildschirmhälfte zu sehen ist, vergleichen. Auf diese Weise wird eine individuelle Lernkontrolle sichergestellt.

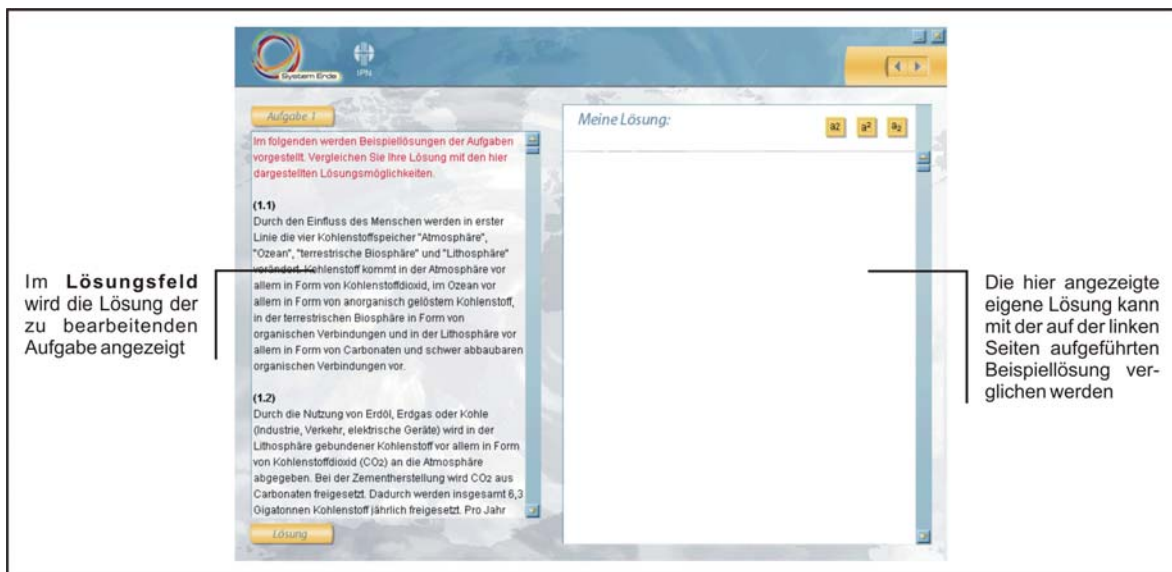
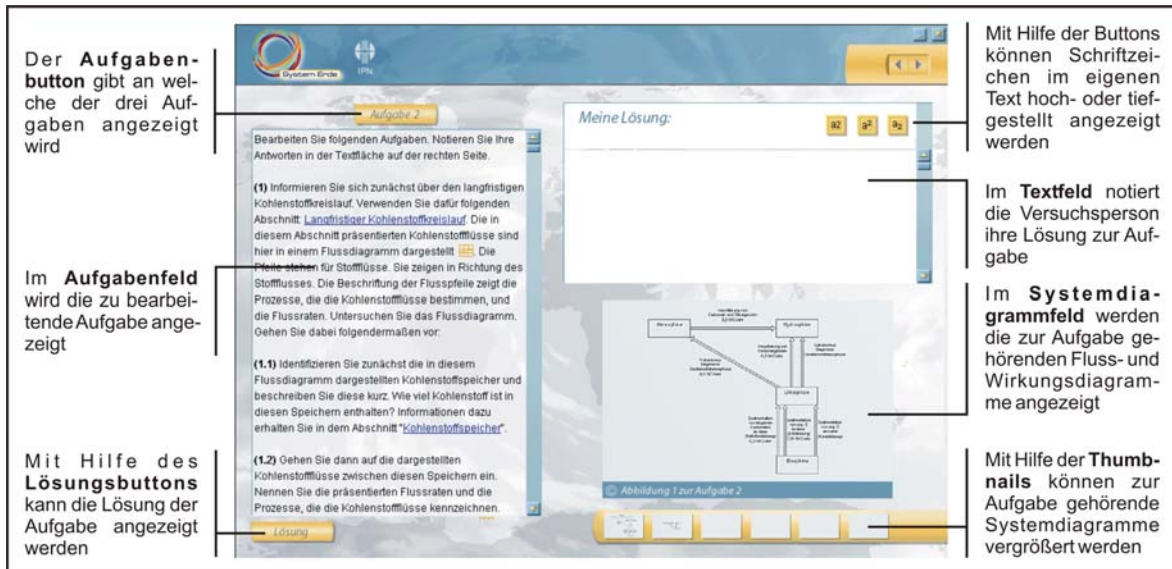
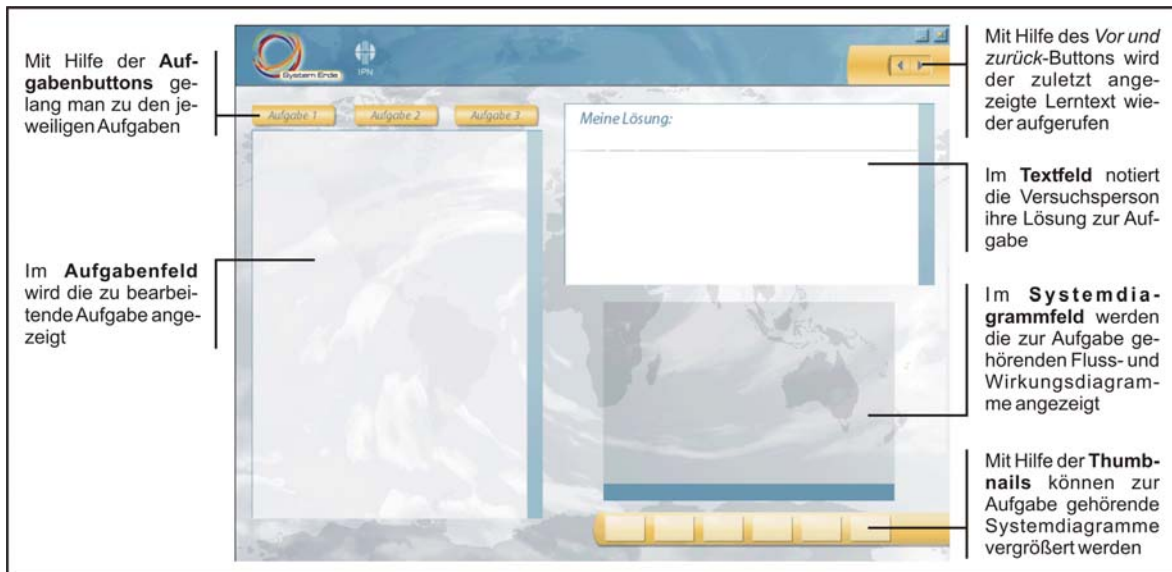


Abb. 24: Lösungsseite der Lernsoftwareversionen A 1 und A 2 „ohne Diagramme“.

#### 11.4.2.2 Lernumgebung B 1 und B 2

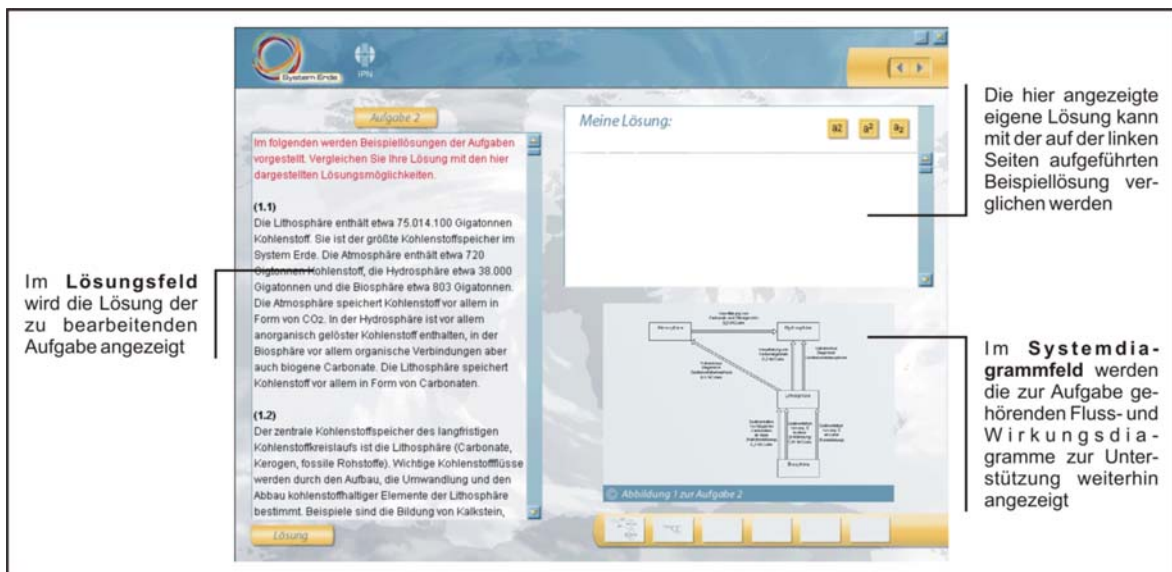
Die Lernaufgaben innerhalb der Lernumgebungen B 1 und B 2 beinhalten fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme. Die Aufgabenseiten gliedern sich grob in vier Teile: ein Aufgabenfeld, ein Textfeld, ein Systemdiagrammfeld und Thumbnails (siehe Abb. 25 auf Seite 143). Nach Aktivierung einer der Aufgabenbuttons am linken oberen Bildschirmrand ist die jeweilige Aufgabe im Aufgabenfeld zu sehen. Zudem werden die zur Aufgabe gehörenden Fluss- und Wirkungsdiagramme in einer Leiste rechts unten mit Thumbnails angezeigt. Wird ein Thumbnail aktiviert, erscheint das jeweilige Diagramm vergrößert im Systemdiagrammfeld. In das Textfeld tragen die Schülerinnen und Schüler ihre Aufgabenlösung ein. Ebenso wie bei den Lernumgebungen A 1 und A 2 gelangen die Lernenden über den *Zurück*-Button in der Menüleiste und die Links innerhalb des Aufgabentextes zu den fachlichen Inhalten, die für die Bearbeitung der Aufgabe notwendig sind.





**Abb. 25:** Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen *B 1* und *B 2* „mit Diagrammen: keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption“.

Im Anschluss an die Aufgabenlösung können die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe des Lösungsbuttons am linken unteren Bildschirmrand eine Beispiellösung im Aufgaben- bzw. Lösungsfeld einsehen (siehe Abb. 26 auf Seite 144). Die Systemdiagrammfunktionen bleiben erhalten. Die Schülerinnen und Schüler können die vorgegebene Lösung mit ihrer eigenen, die auf der rechten Bildschirmhälfte zu sehen ist, vergleichen. Auf diese Weise wird eine individuelle Lernkontrolle sichergestellt.

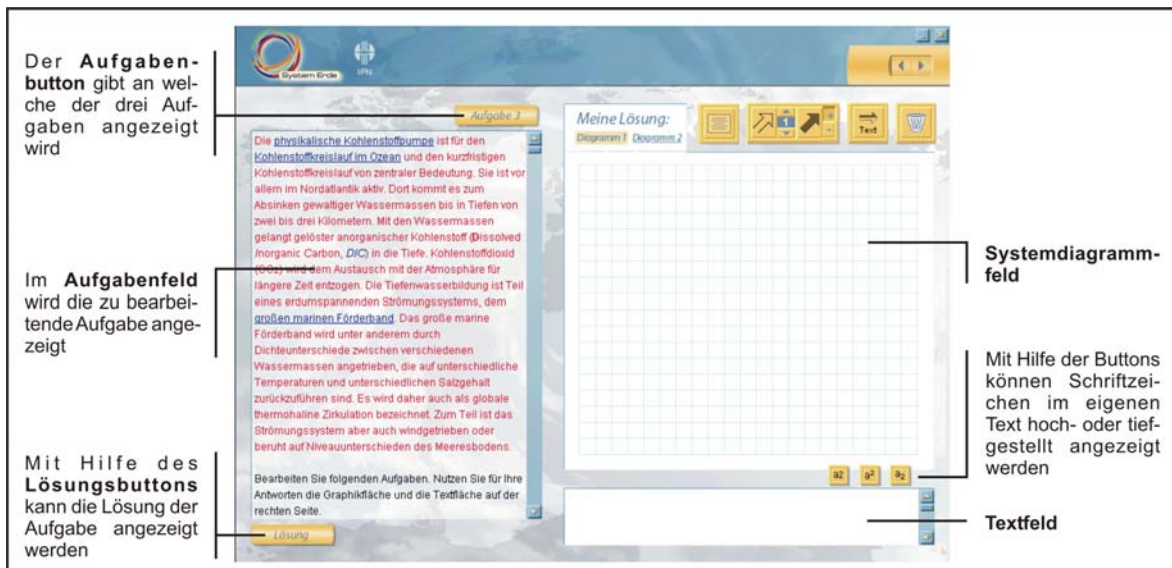
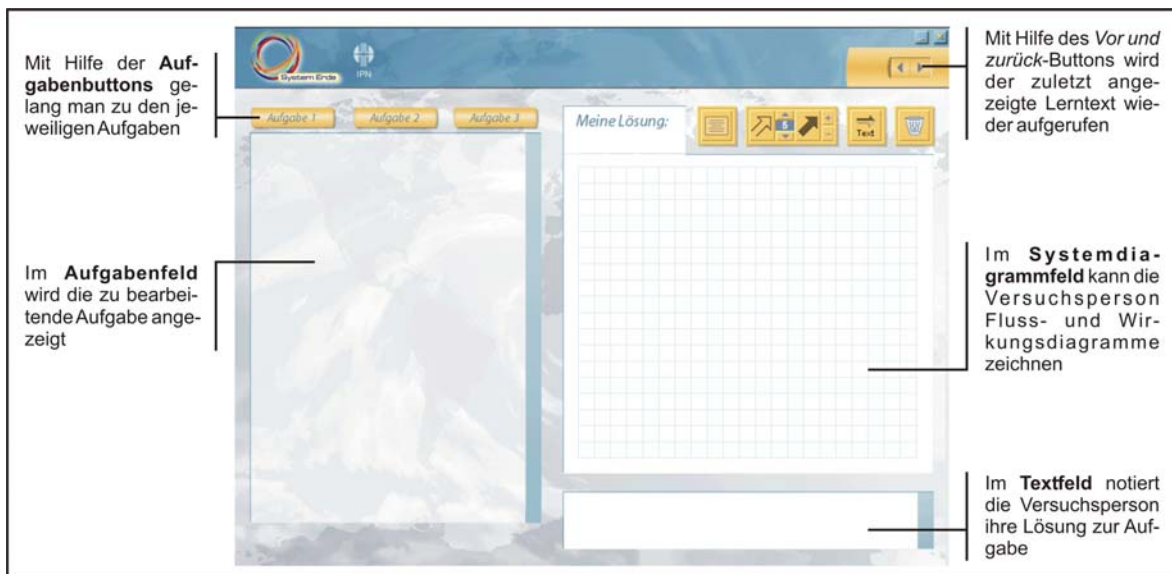


**Abb. 26:** Lösungsseite der Lernsoftwareversionen *B 1* und *B 2* „mit Diagrammen: keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption“.

### 11.4.2.3 Lernumgebung *C 1* und *C 2*

Die Lernaufgaben innerhalb der Lernumgebungen *C 1* und *C 2* leiten die Schülerinnen und Schüler zur aktiven Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen an. Die Aufgaben-seiten gliedern sich grob in drei Teile: ein Aufgabenfeld, ein Textfeld und ein Systemdiagrammfeld (siehe Abb. 27 auf Seite 145). Wie schon bei den Lernumgebungen *A 1*, *A 2*, *B 1* und *B 2* werden die zu bearbeitenden Aufgaben mit Hilfe der Aufgabenbuttons im Aufgabenfeld auf der rechten Bildschirmseite angezeigt. Auch die Suche nach den fachlichen Inhalten, die für den Lösungsprozess von Bedeutung sind, ist gleich gestaltet. Sowohl über den *Zurück*-Button als auch über die direkten Links innerhalb des Aufgabentextes gelangen die Schülerinnen und Schüler zu den Informationsseiten. Die Lernumgebungen *C 1* und *C 2* unterscheiden sich in Bezug auf die Eingabe der Aufgabenlösung grundsätzlich von den anderen vier Lerngruppen. Die Schülerinnen und Schüler der Lerngruppen *C 1* und *C 2* bearbeiten die Aufgaben, indem sie in das Systemdiagrammfeld auf der rechten Bildschirmhälfte Fluss- und Wirkungsdiagramme zeichnen. In das Textfeld unterhalb des Diagrammfeldes können jedoch auch Antworten auf die gestellten Fragen eingetragen werden.

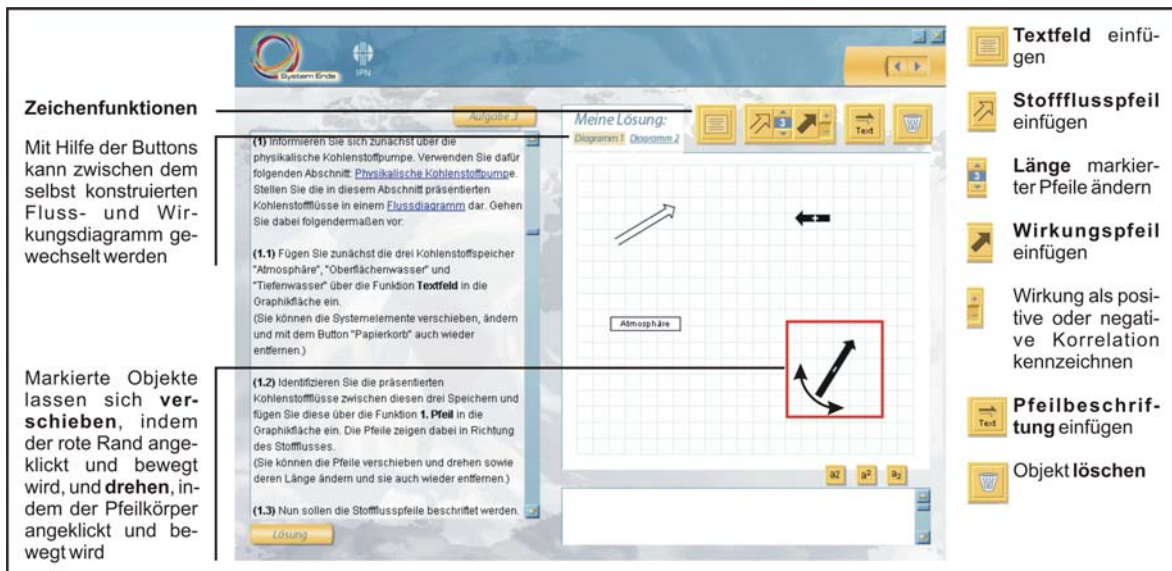




**Abb. 27:** Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen *C 1* und *C 2* „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“ (I).

Die Zeichenfunktionen innerhalb der Aufgabenseiten der Lernsoftwareversionen *C 1* und *C 2* sind in Abb. 28 auf Seite 146 dargestellt. Sie dienen dem Erstellen von Fluss- und Wirkungsdiagrammen. Die Schülerinnen und Schüler können Textfelder, Stoffflusspfeile, Wirkungspfeile und Pfeilbeschriftungen einfügen. Lage und Größe dieser Elemente können beliebig verändert werden. Zudem gibt es die Möglichkeit, Elemente zu löschen. Die Wirkungspfeile können zusätzlich zu einer Beschriftung mit einem Plus- bzw. Minuszeichen versehen werden. Auf diese Weise werden Wirkungen als positive bzw. negative Korrelationen gekennzeichnet.

Das Systemdiagrammfeld bietet die Möglichkeit, zwischen zwei Zeichenflächen zu wechseln. Oberhalb des Diagrammfeldes befinden sich dafür die Buttons *Diagramm 1* und *Diagramm 2*. Auf diese Weise haben die Schülerinnen und Schüler genügend Platz, sowohl ein Fluss- als auch ein Wirkungsdiagramm zu erstellen.



**Abb. 28:** Zeichenfunktionen innerhalb der Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen *C 1* und *C 2* „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“.

Im Anschluss an die Lösung einer Aufgabe können die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe des Lösungsbuttons am linken unteren Bildschirmrand eine Beispiellösung einsehen (siehe Abb. 29 auf Seite 147). Im Aufgaben- bzw. Lösungsfeld auf der linken Bildschirmhälfte erscheint ein Lösungstext. Im Systemdiagramm- bzw. Lösungsdiagrammfeld rechts oben werden mögliche zeichnerische Lösungen angezeigt. Zwei Lösungsdiagrammbuttons unterhalb des Lösungsfeldes dienen dazu, zwischen der Beispiellösung für ein Flussdiagramm und der für ein Wirkungsdiagramm zu wechseln. Die von den Schülerinnen und Schülern selbst konstruierten Diagramme können mit Hilfe der Buttons *Diagramm 1* und *Diagramm 2* geöffnet werden. Ihre erstellten Texte sind weiterhin im Textfeld unterhalb der Zeichenfunktionen einzusehen. Die Schülerinnen und Schüler können auf diese Art die vorgegebene Lösung mit ihrer eigenen vergleichen und ihr eigenes Lernen kontrollieren.

Mit Hilfe der Buttons können selbst konstruierte Systemdiagramme im Systemdiagrammfeld angezeigt werden, um sie mit den Lösungsdiagrammen zu vergleichen

Im Lösungsfeld wird die Lösung der zu bearbeitenden Aufgabe angezeigt

Mit Hilfe des Lösungsdiagrammbuttons können die Systemdiagramme, die zur Beispiellösung gehören, im Lösungsdiagrammfeld rechts angezeigt werden

Im Lösungsdiagrammfeld werden die Beispiellösungsdiagramme (Fluss- und Wirkungsdiagramme) angezeigt

Die hier angezeigte eigene Lösung kann mit der auf der linken Seite angeführten Beispiellösung verglichen werden

Im Lösungsdiagrammfeld wird das Beispiellösungsdiagramm 2 der Aufgabe 3, ein Wirkungsdiagramm, angezeigt

Abb. 29: Lösungsseite der Lernsoftwareversionen C 1 und C 2 „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“.

## 12 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie vorgestellt. In Kapitel 12.1 werden zunächst allgemeine deskriptive Statistiken dargestellt. Sie sind für die Interpretation folgender Ergebnisse von Bedeutung. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse zu den in Kapitel 8 auf Seite 87 ff. formulierten Forschungshypothesen präsentiert. Zu jeder Hypothese werden die spezifischen deskriptiven Statistiken und die hypothesenprüfenden statistischen Analysen dargestellt. Die Vorstellung der Ergebnisse geht einher mit der Formulierung erster Auswertungen. Eine umfassende Analyse und Diskussion der Ergebnisse schließt sich in Kapitel 13 auf Seite 274 ff. an. In Kapitel 12.8 auf Seite 259 ff. werden ergänzend latente Klassenanalysen vorgestellt.

### 12.1 Allgemeine deskriptive Statistiken

#### 12.1.1 Personaldaten

##### 12.1.1.1 Geschlecht und Alter

Von den 102 Versuchspersonen, die in der Auswertung berücksichtigt worden sind, sind 62 weiblich und 40 männlich. Das Alter reicht von 16 bis 20 Jahre. Das Durchschnittsalter liegt bei etwa 18 Jahren. Die Altersstruktur ist in Abb. 30 auf Seite 149 dargestellt. Die Altersunterschiede sind auf bundeslandspezifische Lehrpläne und Oberstufenverordnungen zurückzuführen. Der globale Kohlenstoffkreislauf wird im Biologie-, Chemie- und Erdkundeunterricht verschiedener Jahrgangsstufen behandelt. Zudem bietet der fächerverbindende und systemtheoretische Ansatz die Möglichkeit, das Thema im Rahmen eines Ergänzungs-<sup>45</sup> und Methodenunterrichts<sup>46</sup> oder Projektkurses<sup>47</sup> zu bearbeiten.

	N	M	SD	Min	Max
Alter	102	17,8	1,044	16	20

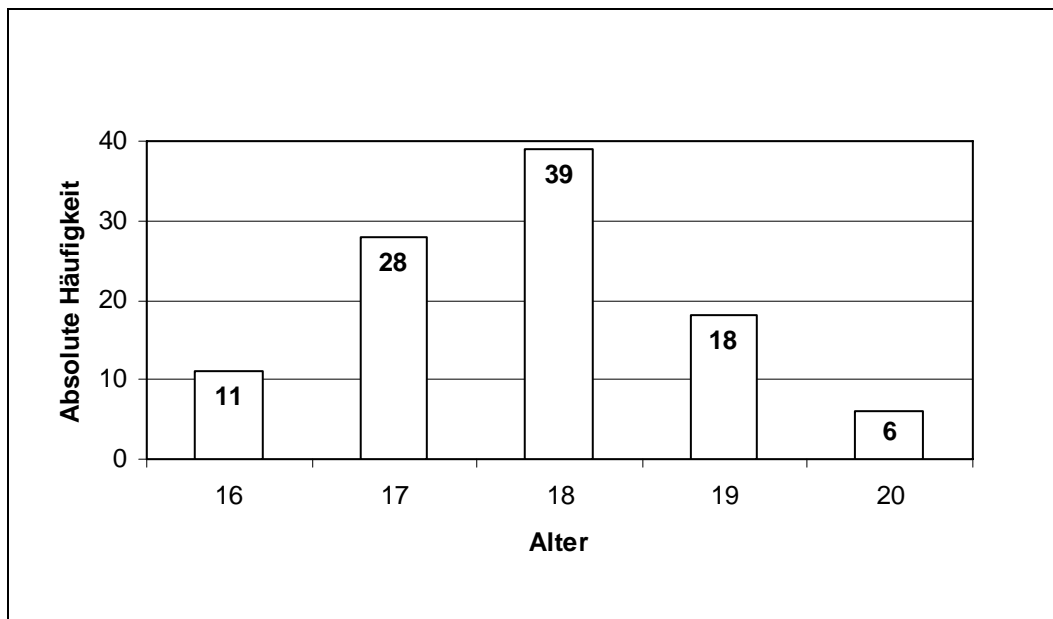
**Tab. 23:** Deskriptive Statistiken für das Alter der Versuchspersonen.

---

<sup>45</sup> Siehe Kapitel 10.1.

<sup>46</sup> Siehe Kapitel 10.1.

<sup>47</sup> Projektkurse sind an Gymnasien und Gesamtschulen in Schleswig-Holstein Pflichtkurse im 13. Jahrgang. Über einen größeren Zeitraum werden selbständig und handelnd fächerübergreifende Projekte durchgeführt (OVO, 1998).

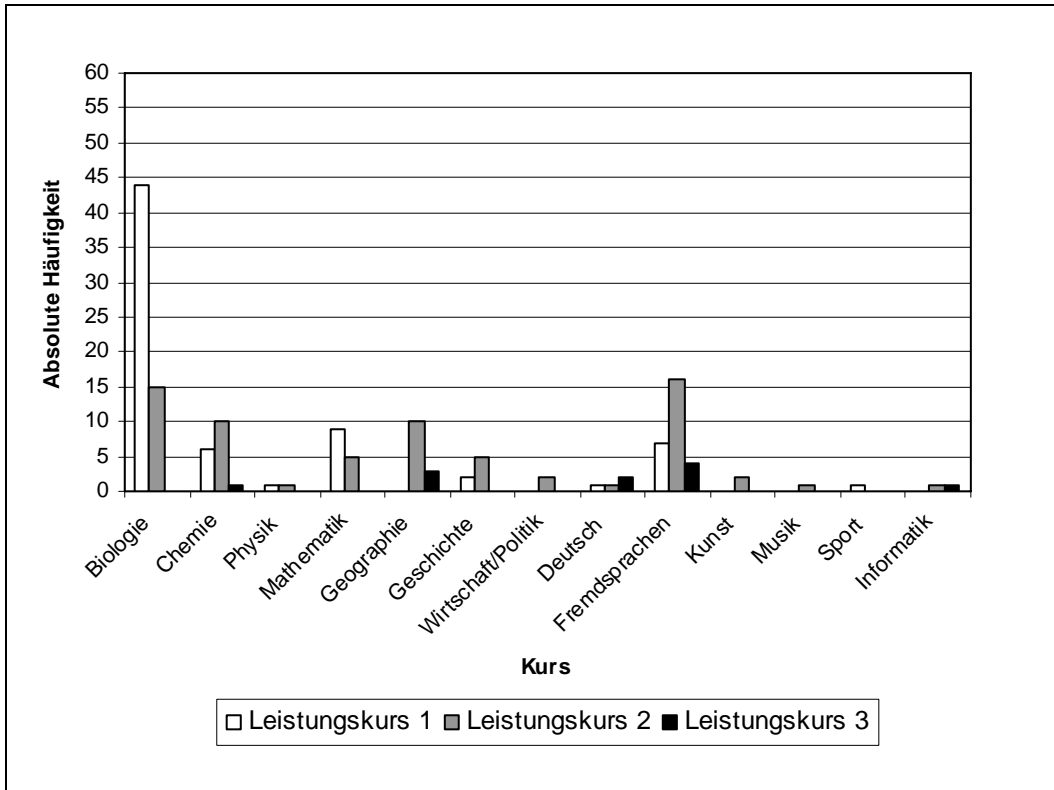


**Abb. 30:** Absolute Häufigkeiten des Alters der 102 Versuchspersonen.

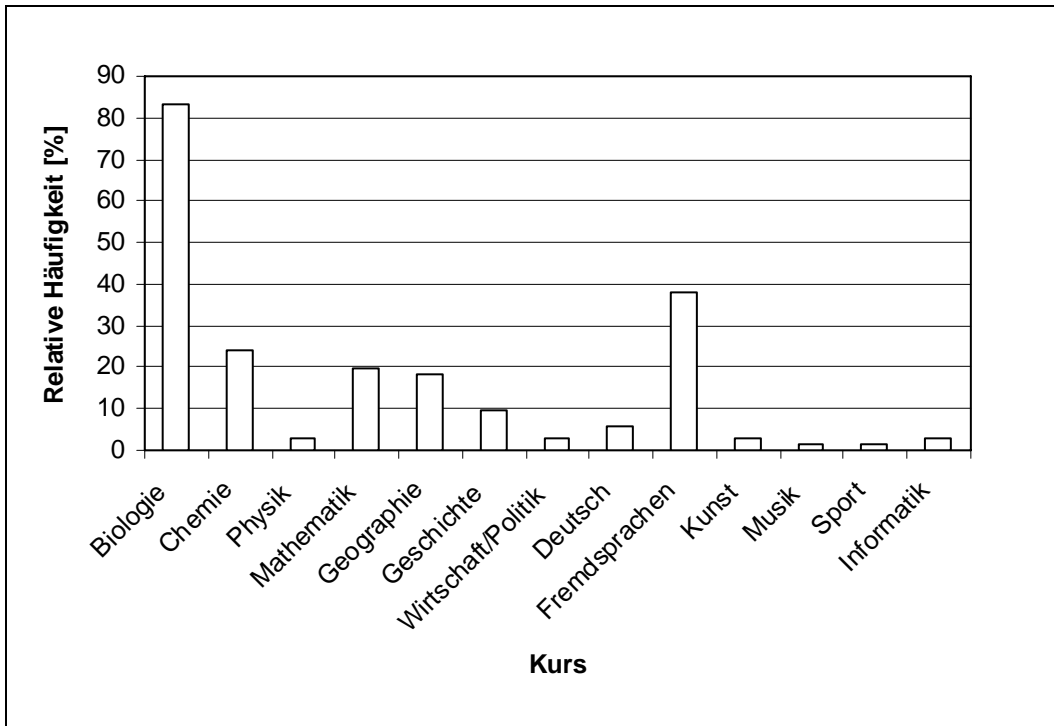
### 12.1.1.2 Leistungskurse

Von den 102 Versuchspersonen, die in der Auswertung berücksichtigt sind, haben etwa 70 % zwei Leistungskurse angegeben. Aufgrund bundeslandspezifischer Oberstufenverordnungen und schulspezifischer Profile haben elf dieser Schülerinnen und Schüler zusätzlich noch einen dritten Leistungskurs genannt. Die übrigen Versuchspersonen haben die 11. Jahrgangsstufe besucht und sind im Klassenverband unterrichtet worden. Sie haben daher noch nicht an Leistungskursen teilgenommen. Die absoluten Häufigkeiten der von etwa 70 % der Versuchspersonen angegebenen Leistungskurse sind in Abb. 31, die relativen Häufigkeiten in Abb. 32 auf Seite 150 dargestellt.

Etwa 83 % der Versuchspersonen des 12. und 13. Jahrgangs ( $N = 71$ ) haben den Leistungskurs Biologie gewählt, etwa 24 % den Leistungskurs Chemie (siehe Abb. 32). Die Leistungskurse Mathematik und Geographie werden mit etwa 20 % ebenfalls relativ häufig genannt. Lediglich zwei Versuchspersonen geben die Naturwissenschaft Physik als Leistungskurswahl an.



**Abb. 31:** Absolute Häufigkeiten der Leistungskurse (N=71; Schülerinnen und Schüler des 12. und 13. Jahrgangs).



**Abb. 32:** Relative Häufigkeiten der Leistungskurse (N=71; Schülerinnen und Schüler des 12. und 13. Jahrgangs).

### 12.1.1.3 Fächerbeliebtheit

Von den 102 Versuchspersonen, die in der Auswertung berücksichtigt sind, haben alle ein Lieblingsfach angegeben. Nur 98 Schülerinnen und Schüler nennen auch ihr unbeliebtestes Fach. Die Häufigkeiten der beliebtesten und unbeliebtesten Fächer sind in Abb. 33 dargestellt. Die Wahl der Leistungskurse (siehe Kapitel 12.1.1.2 auf Seite 149 f.) spiegelt sich vor allem im Bereich der Naturwissenschaften in den Angaben zum beliebtesten bzw. unbeliebtesten Fächern wieder. Die Struktur der Leistungskurswahl und die Struktur der Fächerbeliebtheit zeigen ähnliche Tendenzen. Das Fach Biologie ist beliebter als das Fach Chemie. Das Fach Physik ist relativ unbeliebt. Bei 17 Personen ist das Fach Biologie am beliebtesten. Keine Versuchsperson stuft diese Naturwissenschaft als unbeliebt ein. Das Fach Chemie hingegen wird von zehn Schülerinnen und Schülern als beliebtestes Fach und von sieben als unbeliebtestes Fach genannt. Lediglich zwei Personen geben Physik als beliebtestes Fach an, sieben als unbeliebtestes Fach. Am wenigsten beliebt sind die Fächer Mathematik, Geschichte und Deutsch. Etwa 23 % der Schülerinnen und Schüler geben Mathematik als unbeliebtestes Fach an. Sport ist für über 18 % das beliebteste Fach.

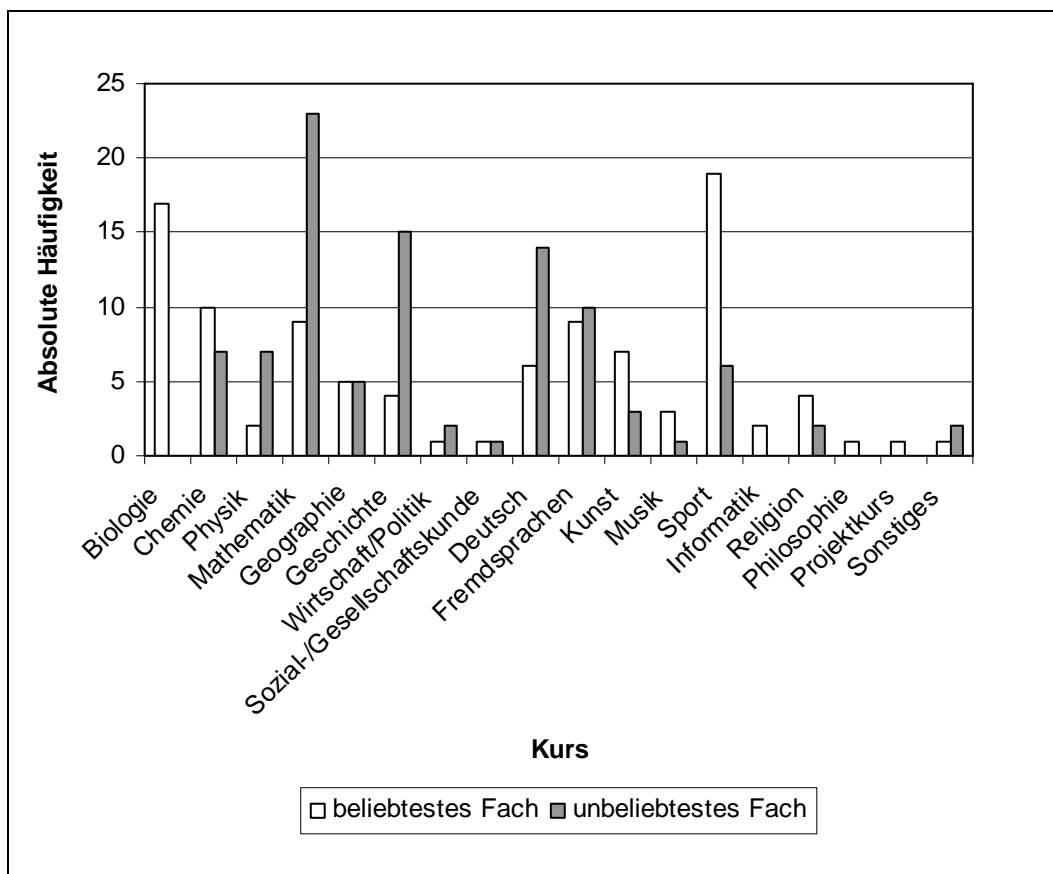


Abb. 33: Absolute Häufigkeiten der beliebtesten und unbeliebtesten Fächer.

#### 12.1.1.4 Zeugnisnoten

Die letzten Zeugnisnoten werden nicht von allen Versuchspersonen angegeben. Dies ist unter anderem auf die mögliche Abwahl einzelner Fächer in der Sekundarstufe II zurückzuführen. Von den für die Auswertung berücksichtigt 102 Schülerinnen und Schüler geben 98 % ihre Mathematiknote, 95 % ihre Biologienote, 90 % ihre Chemienote, 85 % ihre Geographienote und 75 % ihre Physiknote an. Die deskriptive Statistik ist in Tab. 24 aufgeführt. Abb. 34 auf Seite 153 zeigt die Häufigkeitsverteilung der letzten Zeugnisnoten.

Letzte Zeugnisnote im Fach...	N	M	SD	Min	Max
Biologie	97	2,64	0,880	1	5
Chemie	92	2,84	1,030	1	5
Physik	77	3,04	0,993	1	5
Geographie	87	2,81	0,914	1	4
Mathematik	100	3,01	1,030	1	5

**Tab. 24:** Deskriptive Statistiken für die letzten Zeugnisnoten der Versuchspersonen.

Die Versuchspersonen haben im Fach Biologie relativ gute Zeugnisnoten erreicht. Etwa 46 % der Schülerinnen und Schüler, die eine Benotung im Fach Biologie angegeben haben, erhielten die Noten „Eins“ oder „Zwei“. Lediglich etwa 15 % haben die Noten „Vier“ und „Fünf“ angegeben.

Im Fach Chemie erreichen hingegen nur etwa 37 % der Versuchspersonen eine „Eins“ oder „Zwei“. Etwa 22 % haben die Noten „Vier“ und „Fünf“ erhalten.

Im Fach Physik sind die letzten Zeugnisnoten noch schlechter ausgefallen. Lediglich etwa 31 % der Schülerinnen und Schüler, die eine Benotung für das Fach Physik angegeben haben, haben die Noten „Eins“ oder „Zwei“ erhalten. 35 % haben die Noten „Vier“ und „Fünf“ erzielt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bereits ein Viertel aller Versuchspersonen das Fach Physik abgewählt hat. Die Auswertung der angegebenen Zeugnisnoten spiegelt im Bereich der naturwissenschaftlichen Fächer ähnliche Ergebnisse wie die Auswertungen der Leistungskurswahl (siehe Kapitel 12.1.1.2 auf Seite 149 f.) und der Fächerbeliebtheit (siehe Kapitel 12.1.1.3 auf Seite 151 f.) wieder.

Im Fach Geographie haben die Schülerinnen und Schüler relativ gute Zeugnisnoten erzielt. Der Mittelwert der Geographienoten ist mit 2,81 etwas schlechter als der Mittelwert der Biologienoten (2,64) und etwas besser als der Mittelwert der Chemienoten (2,84). Das Notenspektrum reicht jedoch nur von der Note „Eins“ bis zur Note „Vier“. Von den 86 Ver-



suchspersonen, die eine Geographienote angegeben haben, haben etwa 34 % eine „Eins“ oder „Zwei“ und etwa 24 % eine „Vier“ erzielt.

Die Mathematiknote haben 100 der 102 Versuchspersonen angegeben. Da das Fach Mathematik bis einschließlich des 13. Jahrgangs belegt werden muss, haben zwei Schülerinnen und Schüler vermutlich ihre Note in diesem Fach vergessen bzw. nicht angeben wollen. Etwa 30 % der abgegebenen Mathematiknoten haben die Werte „Eins“ und „Zwei“ erzielt, ebenfalls 30 % die Werte „Vier“ und „Fünf“.

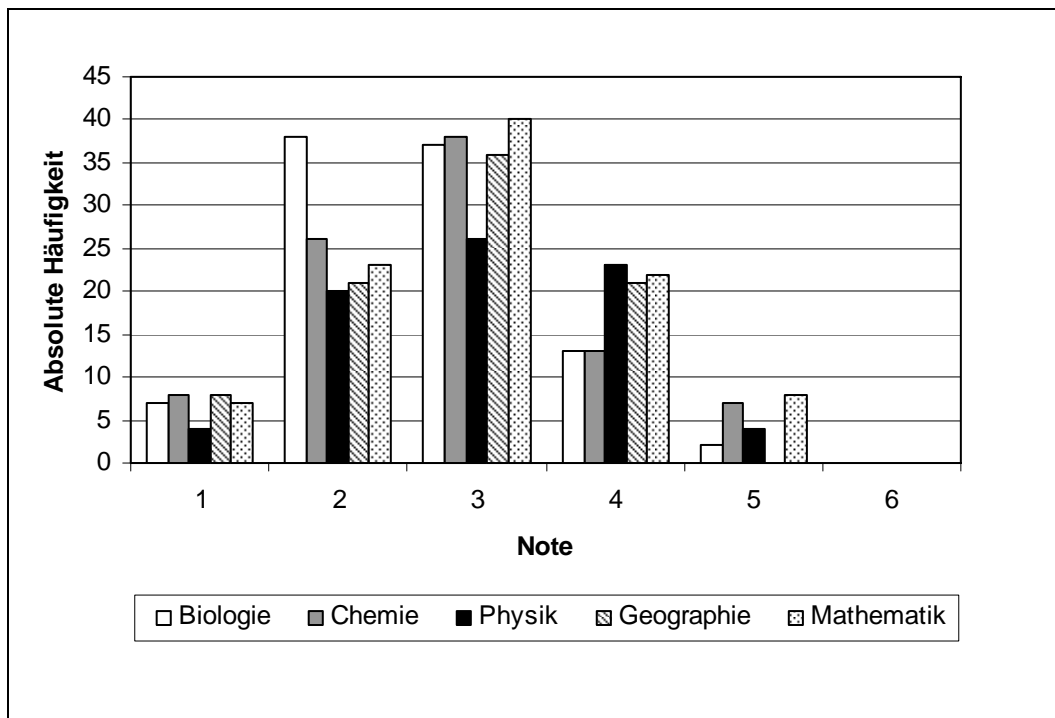
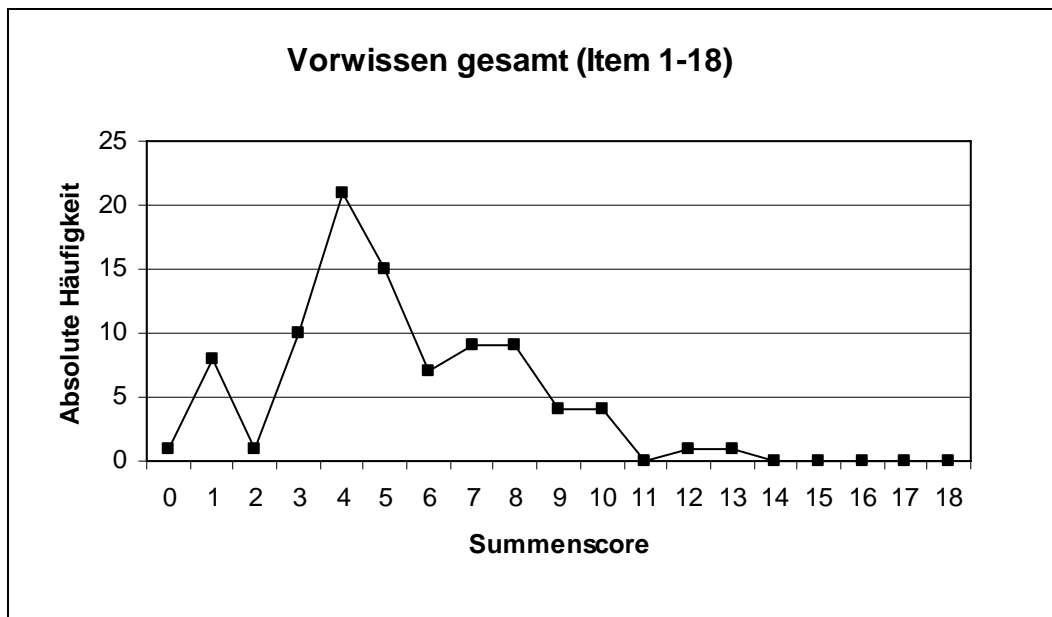


Abb. 34: Absolute Häufigkeiten der letzten Zeugnisnoten.

## 12.1.2 Vorwissen

### 12.1.2.1 Häufigkeiten der Summenscores in der Kategorie Vorwissen differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

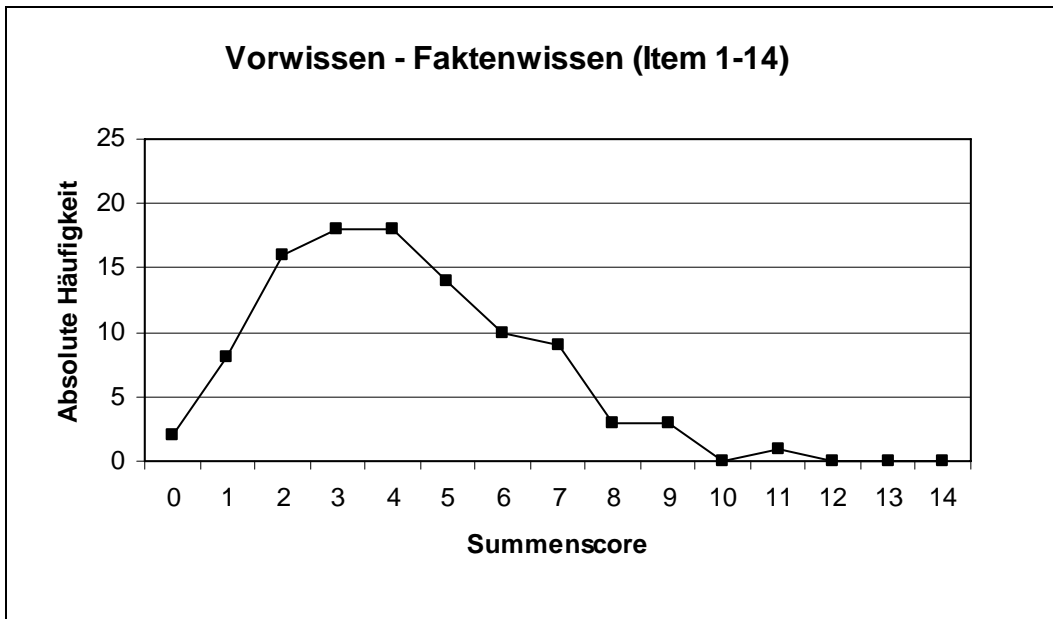
Im Vortest dienen 18 Items der Erhebung des Vorwissens. Die Items werden nach Faktenwissen (Item 1 – 14) und Verständnis (Item 15 – 18) differenziert. Jedes richtig beantwortete Item wird mit einem Punkt bewertet. Damit können in der Kategorie *Vorwissen* maximal 18 Punkte erreicht werden. Es entfallen maximal 14 Punkte auf die Kategorie *Faktenwissen* und maximal vier Punkte auf die Kategorie *Verständnis*. Abb. 35 zeigt die absoluten Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen*.



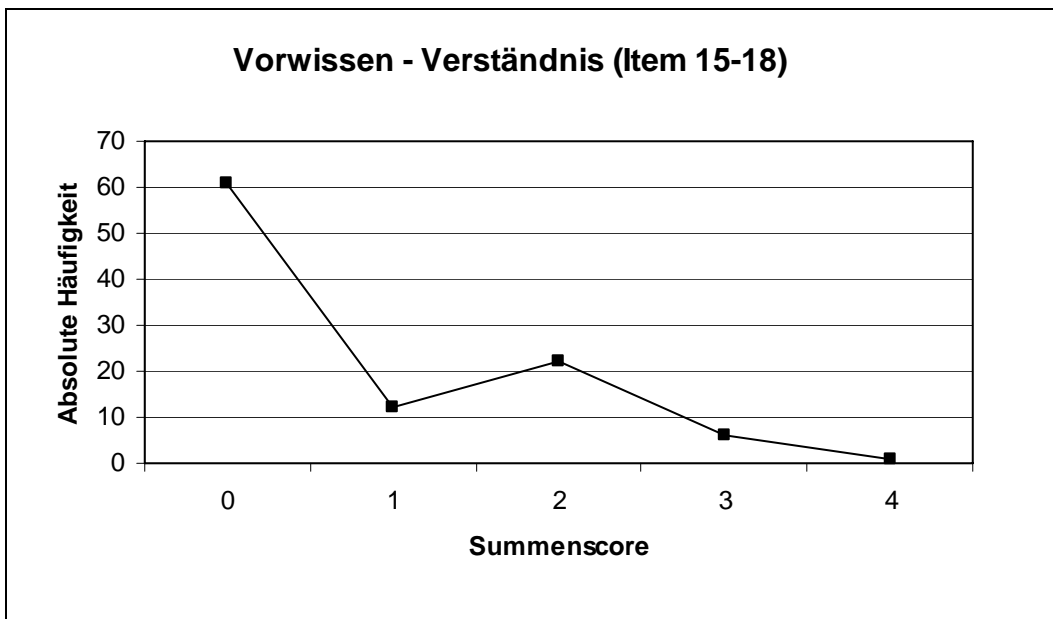
**Abb. 35:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen* gesamt (Item 1 – 18).

Etwa 94 % der Versuchspersonen erreichen lediglich bis zur Hälfte der maximal erreichbaren 18 Punkte. Über 72 % der Versuchspersonen erzielen bis zu einem Drittel der Punkte (sechs von 18 Punkten). Die Vorwissensitems im Vortest sind vermutlich zu anspruchsvoll gewesen. Die Summenscores sind im Bereich von null bis 13 Punkten normalverteilt. Sie erreichen die maximalen Häufigkeiten im mittleren Bereich der ermittelten Summenscores.

Abb. 36 und Abb. 37 auf Seite 155 geben die absoluten Häufigkeiten der erzielten Summenscores differenziert nach Faktenwissen und Verständnis wieder. Die Summenscores für das Faktenwissen (siehe Abb. 36) sind im Bereich von null bis elf Punkten ebenfalls normalverteilt. 93 % der Versuchspersonen erreichen bis zur Hälfte der maximal 14 Punkte. Die Summenscores für das Verständnis sind nicht normalverteilt (siehe Abb. 37). Die maximalen Häufigkeiten sind nicht im mittleren Bereich der auftretenden Summenscores zu verzeichnen. Etwa 59 % der Schülerinnen und Schüler erreichten null der maximal vier Punkte. Über 28 % der Versuchspersonen erzielen jedoch zwei bis vier Punkte.



**Abb. 36:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen – Faktenwissen* (Item 1 – 14).



**Abb. 37:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen – Verständnis* (Item 15 – 18).

### 12.1.2.2 Deskriptive Statistiken der Summenscores in der Kategorie *Vorwissen* differenziert nach *Faktenwissen* und *Verständnis*

Die deskriptiven Statistiken verdeutlichen die Auswertung über die Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen* (siehe Kapitel 12.1.2.1 auf Seite 153 f.). Sie sind in Tab. 25 aufgeführt. Insgesamt wird beim *Vorwissen* ein Mittelwert von 4,89 Punkten erreicht. Bei maximal 18 erreichbaren Punkten ist dieser Wert relativ gering. Eine Differenzierung der Items (Item 1 – 18) in *Faktenwissens*items (Item 1 – 14) und *Verständnis*items (Item 15 – 18) zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis*. Im Vergleich zur Kategorie *Faktenwissen* erzielen die Schülerinnen und Schüler in der Kategorie *Verständnis* relativ geringe Punktzahlen. Der Mittelwert der Summenscores der *Verständnis*items liegt lediglich bei 0,76 Punkten (maximal vier Punkte), der Mittelwert der Summenscores der *Faktenwissens*items liegt bei 4,13 Punkten (maximal 14 Punkte). Demnach sind die erreichten Punkte vor allem den *Faktenwissens*items zuzuordnen.

	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Vorwissen</i> gesamt (Item 1 – 18)	102	4,89	2,673	0	13
Summenscore <i>Vorwissen</i> – <i>Faktenwissen</i> (Item 1 – 14)	102	4,13	2,206	0	11
Summenscore <i>Vorwissen</i> – <i>Verständnis</i> (Item 15 – 18)	102	0,76	1,045	0	4

**Tab. 25:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores in der Kategorie *Vorwissen*.

### 12.1.2.3 Faktorenanalyse der Items in der Kategorie *Vorwissen*

Die 18 Items der Kategorie *Vorwissen* (Item 1 – 18) werden einer Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode unterzogen. Die Varimax-rotierte Lösung ergibt sieben Faktoren, die zusammen 64,991 % (Faktor 1: 16,995 %; Faktor 2: 10,488 %; Faktor 3: 9,415 %; Faktor 4: 7,868 %; Faktor 5: 7,662 %; Faktor 6: 6,581 %; Faktor 7: 5,982 %) der Gesamtvarianz erklären. Die Verteilung der 18 Items auf die sieben Faktoren ist in Tab. 26 auf Seite 157 dargestellt. Tab. 27 auf Seite 158 zeigt die deskriptiven Statistiken. Die drei Items der ersten Hauptkomponente erfassen das Wissen über biochemische Prozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Die zwei Items der zweiten Hauptkomponente erheben das Wissen über Kohlenstoffflüsse im System Erde. Beide Skalen weisen eine gute Reliabilität auf. Die übrigen fünf Skalen zeichnen sich durch relativ schlechte Reliabilität aus.

			Hauptkomponente							
Skala	Item		1	2	3	4	5	6	7	
Anwendungswissen	1	Vortest Frage 15c	biochem. Prozess	<b>0,811</b>	0,025	0,079	-0,051	0,046	-0,170	-0,006
		Vortest Frage 15b	biochem. Prozess	<b>0,726</b>	0,125	-0,032	-0,022	0,039	0,413	-0,032
		Vortest Frage 15a	biochem. Prozess	<b>0,675</b>	0,348	-0,014	0,120	0,085	0,058	0,195
	2	Vortest Frage 14a	Kohlenstofffluss	0,098	<b>0,927</b>	0,064	-0,001	-0,023	3,768 <sup>-5</sup>	0,042
		Vortest Frage 14b	Kohlenstofffluss	0,164	<b>0,879</b>	0,134	0,029	0,123	-0,097	0,017
	3	Vortest Frage 14d	Wirkungsbez.	-0,179	0,001	<b>0,804</b>	-0,133	0,009	0,032	0,077
		Vortest Frage 15f	geochem. Prozess	0,234	0,033	<b>0,706</b>	0,033	-0,060	-0,088	0,013
		Vortest Frage 14c	Wirkungsbez.	-0,032	0,296	<b>0,616</b>	0,004	0,137	-0,040	-0,035
		Vortest Frage 18	Nahrungskette	0,223	-0,218	<b>0,462</b>	0,371	-0,022	0,268	-0,184
	Basiswissen	4	Vortest Frage 17	Destruenten	0,120	0,218	0,043	<b>0,699</b>	0,118	-0,300
Vortest Frage 2			Elementarer Kohlenstoff	0,020	-0,060	-0,010	<b>0,631</b>	-0,307	-0,028	0,165
Vortest Frage 8			Erdöl	-0,187	-0,066	-0,167	<b>0,544</b>	0,233	0,327	0,006
5		Vortest Frage 1	Chem. Gleichgewicht	0,064	0,073	0,127	-0,111	<b>0,673</b>	-0,284	0,281
		Vortest Frage 5	Elektronenakzeptor	0,205	0,106	0,101	0,001	<b>0,629</b>	0,135	0,070
		Vortest Frage 7	Zellatmung	0,171	0,088	0,271	-0,110	<b>-0,577</b>	-0,166	0,282
6		Vortest Frage 15e	geochem. Prozess	0,054	-0,064	-0,006	-0,074	0,043	<b>0,855</b>	0,078
7		Vortest Frage 4	Fotosynthese-gleichung	0,338	-0,026	0,074	0,256	0,174	0,039	<b>0,731</b>
		Vortest Frage 15d	geochem. Prozess	0,485	-0,132	0,104	0,147	0,046	-0,121	<b>-0,633</b>

**Tab. 26:** Rotierte Komponentenmatrix der 18 Items der Kategorie *Vorwissen* (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).

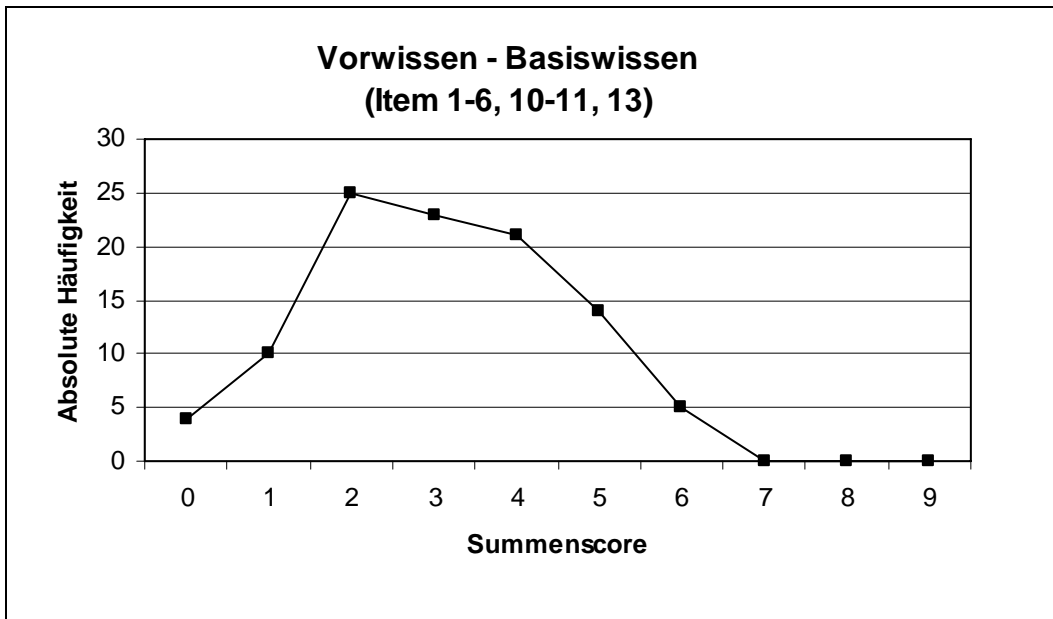
Skala		N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
1	biochem. Prozess	102	3	0,66	0,949	0,6963
2	Kohlenstofffluss	102	2	0,62	0,879	0,8949
3	Wirkungsbez., geochem. Prozess, Nahrungskette	102	4	0,55	0,753	0,4005
4	Biologie/Chemie/Geologie (Zersetzung)	102	3	1,45	0,940	0,3154
5	Biochemie	102	3	1,21	0,860	0,0512
6	geochem. Prozess	102	1	0,04	0,195	-
7	Fotosynthese, geochem. Prozess	102	2	0,37	0,506	-0,1745

**Tab. 27:** Deskriptive Statistiken der Kategorie *Vorwissen*.

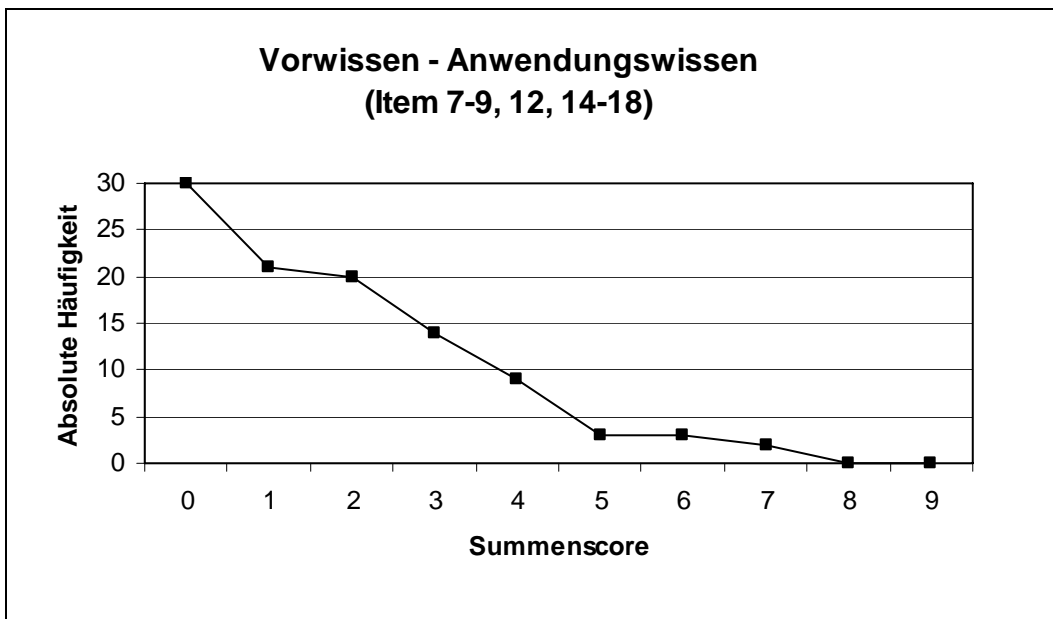
Die neun Items der ersten, zweiten und dritten Hauptkomponente erfassen das Wissen über Prozesse, Stoffflüsse und Wirkungsbeziehungen des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Sie werden zu einer Skala zusammengefasst, mit Hilfe derer das anwendungsorientierte Vorwissen gemessen wird. Die neun Items der vierten bis siebten Hauptkomponente erfassen grundlegendes biologisches, chemisches, physikalisch-chemisches und geologisches Wissen. Die vier Skalen werden zu einer Skala zusammengefasst, die der Erhebung des Basiswissens dient. Die Skala *Anwendungswissen* weist eine relativ gute Reliabilität auf. Die Skala *Basiswissen* erreicht eine relativ schlechte Reliabilität (siehe Tab. 28). Letzteres ist vermutlich auf den heterogenen Charakter der Items zurückzuführen.

Skala		N	N der Items	M	SD	Cronbachs Alpha
<i>Anwendungswissen</i>	Faktor 1 – 3	102	9	1,82	1,760	0,6504
<i>Basiswissen</i>	Faktor 4 – 7	102	9	3,07	1,484	0,2425

**Tab. 28:** Deskriptive Statistiken der Kategorie *Vorwissen* differenziert nach *Basiswissen* und *Anwendungswissen*.



**Abb. 38:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen – Basiswissen* (Item 1 – 6, 10 – 11, 13).



**Abb. 39:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen – Anwendungswissen* (Item 7 – 9, 12, 14 – 18).

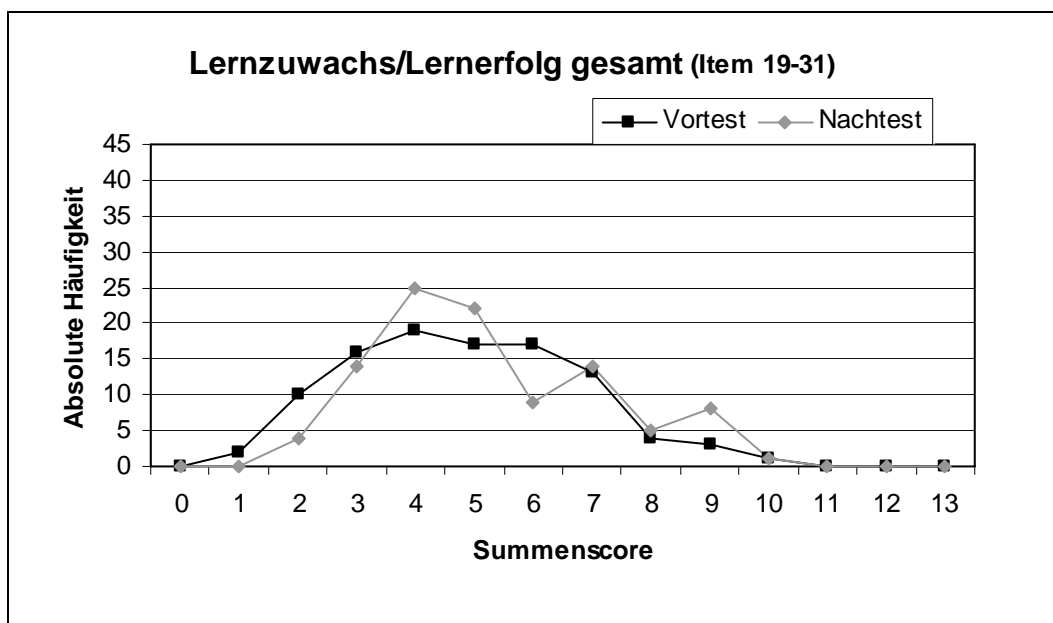
Die Abbildungen Abb. 38 und Abb. 39 geben die Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Vorwissen* (18 Items) differenziert nach Basiswissen (neun Items) und Anwendungswissen (neun Items) wieder. Da jedes richtig beantwortete Item mit einem Punkt bewertet wird, können in der Kategorie *Vorwissen – Basiswissen* maximal neun Punkte und in der Kategorie *Vorwissen – Anwendungswissen* ebenfalls maximal neun Punkte erreicht werden. Die Summenscores für das Basiswissen sind normalverteilt. Die

maximalen Häufigkeiten sind im mittleren Bereich der ermittelten Summenscores zu verzeichnen. Etwa 39 % der Versuchspersonen erreichen vier oder mehr Punkte (maximal neun Punkte). Über 60 % erzielen weniger als vier Punkte (null bis drei Punkte). Somit haben die Basiswissenitems einen angemessenen Schwierigkeitsgrad gehabt. Die Summenscores für das Anwendungswissen sind nicht normalverteilt. Etwa 92 % der Schülerinnen und Schüler erreichen lediglich bis maximal vier der erreichbaren neun Punkte. Die Anwendungswissenitems sind vermutlich zu anspruchsvoll gewesen.

### 12.1.3 Lernzuwachs/Lernerfolg

#### 12.1.3.1 Häufigkeiten der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

13 Items dienen der Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*. Sie sind sowohl im Vortest als auch im Nachtest eingesetzt worden. Die Items werden nach Faktenwissen (Item 19 – 22) und Verständnis (Item 23 – 31) differenziert. Jedes richtig beantwortete Item wird mit einem Punkt bewertet. Damit können in der Kategorie *Lernerfolg* maximal 13 Punkte erreicht werden, wobei maximal vier Punkte auf die Kategorie *Faktenwissen* und maximal neun Punkte auf die Kategorie *Verständnis* entfallen.

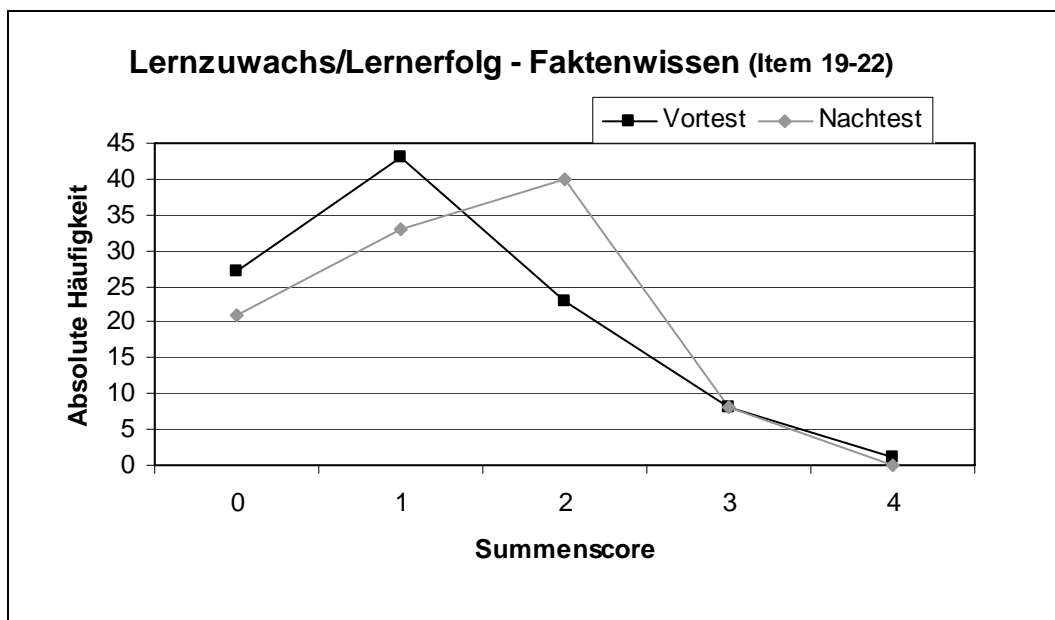


**Abb. 40:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg gesamt* (Item 19 – 31).

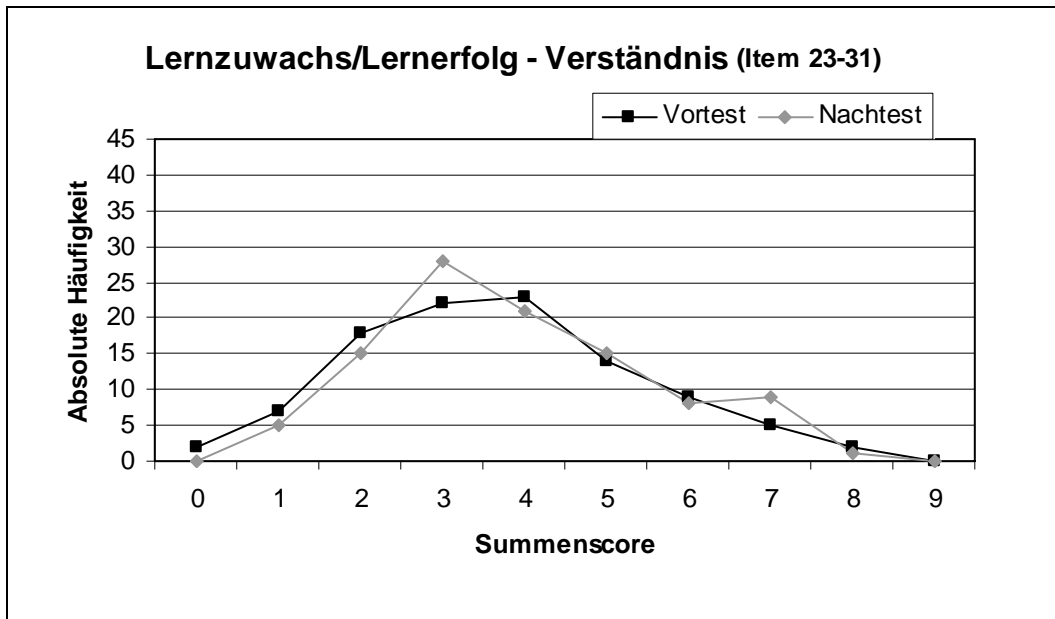


Abb. 40 auf Seite 160 zeigt die Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie *Lernerfolg*. Die Summenscores in der Kategorie *Lernerfolg* sind im Vortest für den Bereich von null bis elf Punkten normalverteilt. Sie erreichen die maximalen Häufigkeiten im mittleren Bereich der erhobenen Summenscores. Somit haben die Lernerfolgitems im Vortest einen angemessenen Schwierigkeitsgrad gehabt. Etwa 79 % der Versuchspersonen haben einen bis maximal sechs Punkte erzielt, die übrigen Schülerinnen und Schüler mehr als die Hälfte der erreichbaren 13 Punkte. Im Nachtest sind die Summenscores im Bereich von einem bis elf Punkten normalverteilt. Die maximalen Häufigkeiten werden im mittleren Bereich der auftretenden Summerscores erreicht. Im Anschluss an den Lernprozess haben sich die Leistungen jedoch nur geringfügig verbessert. Immer noch 72 % der Versuchspersonen haben im Nachtest lediglich bis zu sechs der erreichbaren 13 Punkte erzielt.

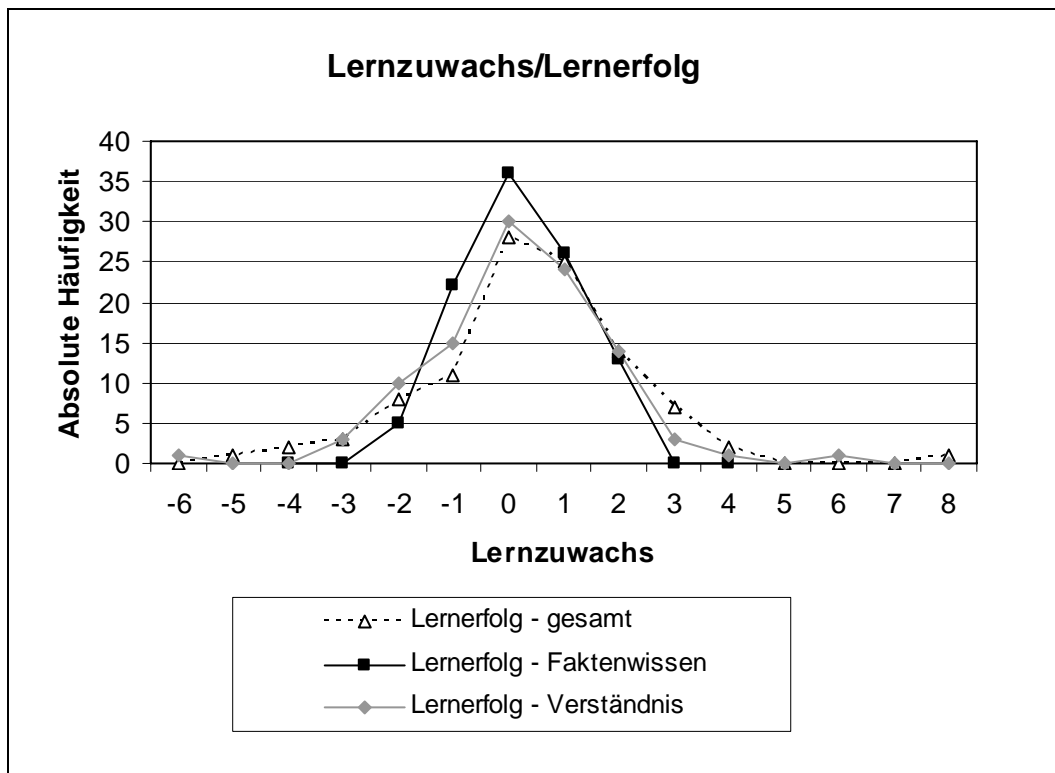
Eine Differenzierung der Lernerfolgitems nach Faktenwissen und Verständnis zeigt, dass sich die Lernleistungen in beiden Kategorien nur schwach verbessert haben (siehe Abb. 41 und Abb. 42). Während bei den Faktenwissenitems im Vortest nur etwa 31 % der Versuchspersonen zwei oder mehr der maximal vier Punkte erreicht haben, sind es im Nachtest etwa 47 % gewesen. Bei den Verständnisitems haben etwa 29 % der Schülerinnen und Schüler im Vortest fünf oder mehr der maximal neun Punkte erreicht, im Nachtest sind es etwa 32 % gewesen.



**Abb. 41:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22).



**Abb. 42:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31).

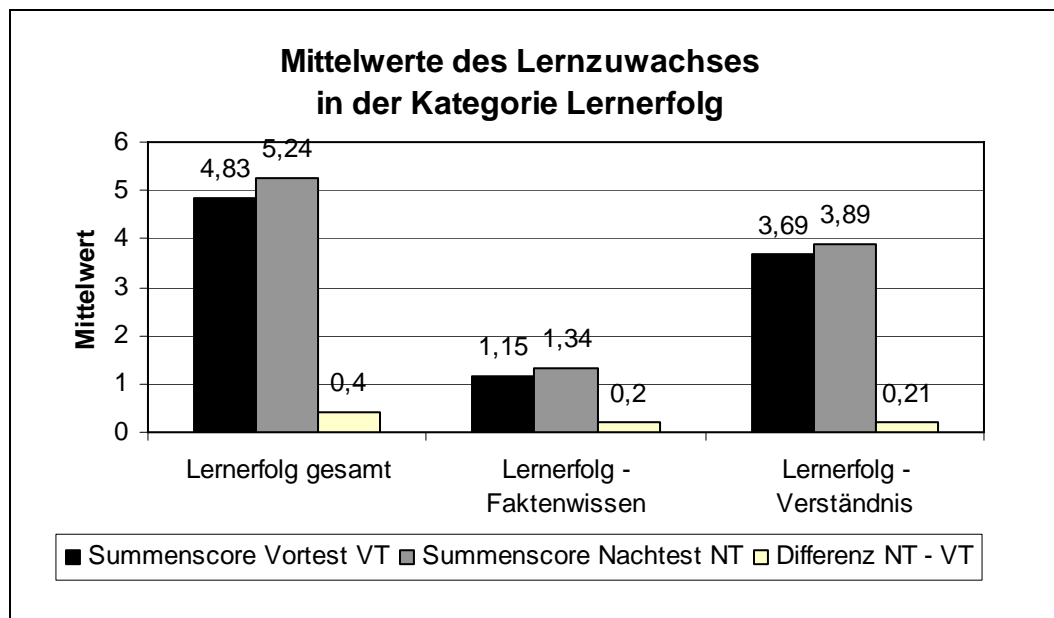


**Abb. 43:** Absolute Häufigkeiten der Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in den Kategorien *Lernerfolg – gesamt* (Item 19 – 31), *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) und *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31).

In Abb. 43 auf Seite 162 werden die absoluten Häufigkeiten der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* dargestellt. Der Lernzuwachs in dieser Kategorie wird als Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest betrachtet (vgl. Tab. 2 auf Seite 98). Ein positiver Lernzuwachs bedeutet demnach, dass im Vortest weniger Punkte als im Nachtest erzielt werden. Bei einem negativen Lernzuwachs ist hingegen im Vortest ein besseres Ergebnis als im Nachtest erreicht worden. Die Struktur der Lernzuwächse in den Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis* weist die gleichen Tendenzen auf. Demnach setzt sich der Lernzuwachs gleichermaßen aus Lernzuwächsen in den Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis* zusammen.

### 12.1.3.2 Deskriptive Statistiken der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach *Faktenwissen* und *Verständnis*

Die Mittelwerte der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* sind in Abb. 44 graphisch dargestellt. Die deskriptiven Statistiken verdeutlichen noch einmal die Aussagen über die Häufigkeiten der Summenscores in Kapitel 12.1.3.1 auf Seite 160 ff. Sie sind in Tab. 29 auf Seite 164 aufgeführt. Beim *Lernerfolg* wird im Vortest ein Mittelwert von 4,83 Punkten erreicht. Dem entspricht nur etwas mehr als ein Drittel der maximal 13 erreichbaren Punkte. Im Nachtest steigt der Mittelwert geringfügig auf 5,24 Punkte, d. h. auf etwa 40 % der maximalen Punktzahl.



**Abb. 44:** Mittelwerte der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*.

Differenziert nach Faktenwissen und Verständnis ergibt sich eine ähnliche Verbesserungsstruktur. Während beim Faktenwissen im Vortest ein Mittelwert von 1,15 Punkten erreicht wird (von maximal vier Punkten), tritt im Nachtest ein Mittelwert von 1,34 Punkten auf. Beim Verständnis erhöht sich der Mittelwert von 3,69 Punkten im Vortest (von maximal neun Punkten) auf 3,89 Punkten im Nachtest. Beim Lernzuwachs wird ein Mittelwert von 0,40 Punkten erreicht. In der Kategorie *Faktenwissen* tritt beim Lernzuwachs ein Mittelwert von 0,20 Punkten auf, in der Kategorie *Verständnis* der Mittelwert 0,21. Es sind demnach sowohl Faktenwissenitems als auch Verständnisitems durchschnittlich besser im Nachtest als im Vortest beantwortet worden. Das Lernen von Faktenwissen und Verständnis ist ausgewogen.

<b>Vortest VT</b>	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	102	4,83	1,940	1	10
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	102	1,15	0,938	0	4
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	102	3,69	1,740	0	8

<b>Nachtest NT</b>	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	102	5,24	1,925	2	10
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	102	1,34	0,895	0	3
Summenscore <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	102	3,89	1,653	1	8

<b>Differenz NT – VT</b>	N	M	SD	Min	Max
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	102	0,40	1,863	-5	8
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	102	0,20	1,072	-2	2
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	102	0,21	1,643	-6	6

**Tab. 29:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*.

### 12.1.3.3 Korrelationen zwischen den Ergebnissen im Vortest und Nachtest bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*

Die Ergebnisse von Vortest und Nachtest weisen bezüglich des gesamten Lernerfolgs und des nach Faktenwissen und Verständnis differenzierten Lernerfolgs paarweise signifikante Zusammenhänge auf. Die Korrelationen nach Pearson zwischen den Ergebnissen im Vortest und Nachtest bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* sind in Tab. 30 dargestellt.

Vortest	Vortest			Nachtest		
	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)	Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)
Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)	1	0,444*** p = 0,000	0,876*** p = 0,000	0,535*** p = 0,000	0,187° p = 0,060	0,522*** p = 0,000
Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)	-	1	-0,044 n.s. p = 0,659	0,227* p = 0,021	0,317*** p = 0,001	0,093 n.s. p = 0,350
Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)	-	-	1	0,474*** p = 0,000	0,038 n.s. p = 0,705	0,532*** p = 0,000

#### Nachtest

Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)	-	-	-	1	0,516*** p = 0,000	0,886*** p = 0,000
Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)	-	-	-	-	1	0,059 n.s. p = 0,558
Summe Lernzuwachs/ Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)	-	-	-	-	-	1

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 30:** Korrelationen nach Pearson zwischen den Ergebnissen im Vortest und Nachtest in den Kategorien des Lernerfolgs.

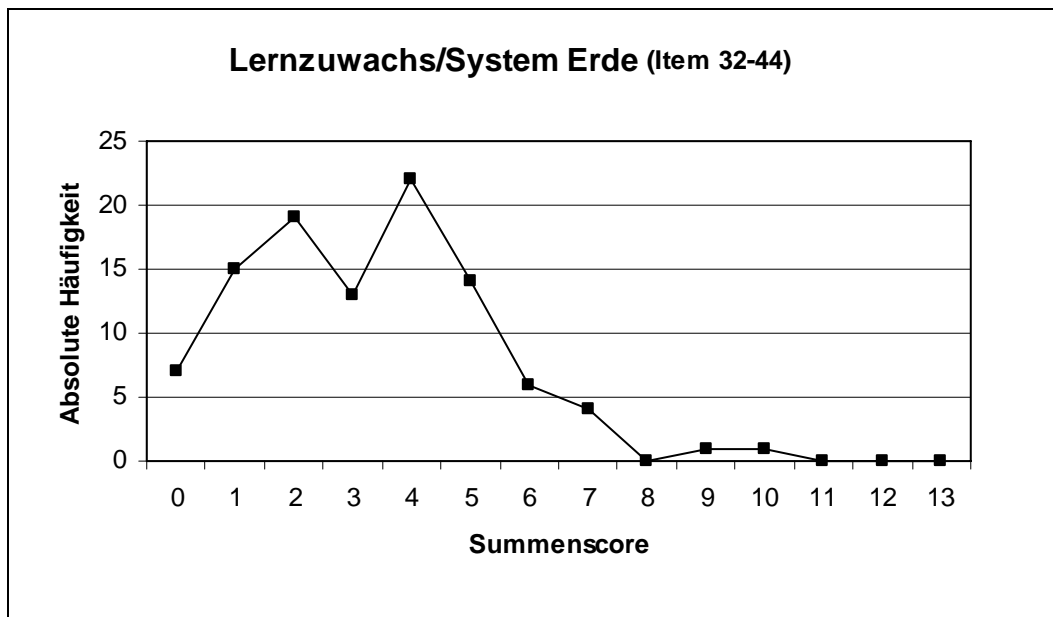
Die Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt* im Vortest korreliert höchst signifikant mit der Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt* im Nachtest ( $r = 0,535$ ;  $p = 0,000$ ). Schülerinnen und Schüler, die im Vortest relativ gute Ergebnisse erreicht haben, haben solche demnach auch im Nachtest. Die Korrelation zwischen Vortest und Nachtest im Verständnis ist ebenfalls relativ hoch ( $r = 0,532$ ;  $p = 0,000$ ), die im Faktenwissen geringer ( $r = 0,317$ ;  $p = 0,001$ ). Das gute Abschneiden bei den Faktenwissensitems im Vortest übt demnach weniger Einfluss auf das Ergebnis bei den Faktenwissensitems im Nachtest aus, als das Abschneiden bei den Verständnisitems im Vortest auf das Ergebnis bei den Verständnisitems im Nachtest. Zudem fällt auf, dass die Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* im Vortest und die Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* im Nachtest keine Zusammenhänge aufweisen ( $r = 0,093$ ). Auch die Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* im Vortest und die Summe *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* im Nachtest korrelieren nicht miteinander ( $r = 0,038$ ). Diese beiden Ergebnisse sind jedoch nicht signifikant.

#### **12.1.4 Lernzuwachs/System Erde**

##### **12.1.4.1 Häufigkeiten der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie System Erde**

Im Nachtest dienen 13 Items (Item 32 – 44) der Erhebung des Wissens über die fachlichen Inhalte der Aufgaben, die im Rahmen der Lernsitzen von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet worden sind. Die Items zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* umfasst direkte Frage zum System „Globaler Kohlenstoffkreislauf“. Sie sind im Vortest nicht eingesetzt worden. Jedes richtig beantwortete Item wird mit einem Punkt bewertet. Damit können bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* maximal 13 Punkte erreicht werden.

Abb. 45 auf Seite 167 zeigt die Häufigkeiten der erzielten Summenscores im Nachtest. Im Bereich von null bis zehn Punkten sind die Summenscores annähernd normalverteilt. Sie erreichen die maximalen Häufigkeiten etwa im mittleren Bereich der erhobenen Summenscores. Ein Viertel der Versuchspersonen hat fünf oder mehr der maximal 13 erreichbaren Punkte erzielt, jedoch hat nur jeweils eine Versuchsperson neun bzw. zehn Punkte bekommen. Etwa 52 % der Schülerinnen und Schüler haben lediglich bis zu drei Punkte erreicht. 22 Versuchspersonen haben mit vier Punkten abgeschnitten.



**Abb. 45:** Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44).

#### 12.1.4.2 Deskriptive Statistiken der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde*

Die deskriptiven Statistiken verdeutlichen noch einmal die Auswertung über die Häufigkeiten der erzielten Summenscores bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (siehe Kapitel 12.1.4.1). Sie sind in Tab. 31 aufgeführt. Insgesamt wird bei den *System Erde*-Items im Nachtest ein Mittelwert von 3,26 Punkten erreicht. Bei maximal 13 erreichbaren Punkten ist dieser Wert relativ gering. Die Standardabweichung ist mit 2,029 Punkten jedoch relativ groß.

	N	M	SD	Min	Max
Summenschore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	102	3,26	2,029	0	10

**Tab. 31:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44).

## 12.2 Einfluss systemischer Darstellungsformen

Zunächst soll untersucht werden, ob das Lernen mit systemischen Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagramme) das Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf verbessert. Dabei soll der Frage nachgegangen werden, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen den Lernprozess am stärksten unterstützt. Zunächst wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg gesamt* überprüft (siehe Kapitel 12.2.1). In Kapitel 12.2.2 auf Seite 171 ff. wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* untersucht, in Kapitel 12.2.3 auf Seite 174 ff. bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde*. Die bereits auf Seite 89 formulierten Hypothesen lauten:

Hypothese 1a            *Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.*

Hypothese 1b            *Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.*

Hypothese 1c            *Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.*

### 12.2.1 Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Die Frage, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen den Lernprozess positiv beeinflusst, wird hier bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* untersucht. Die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) werden nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen differenziert (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 32 auf Seite 169 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 46 auf Seite 170 dargestellt.

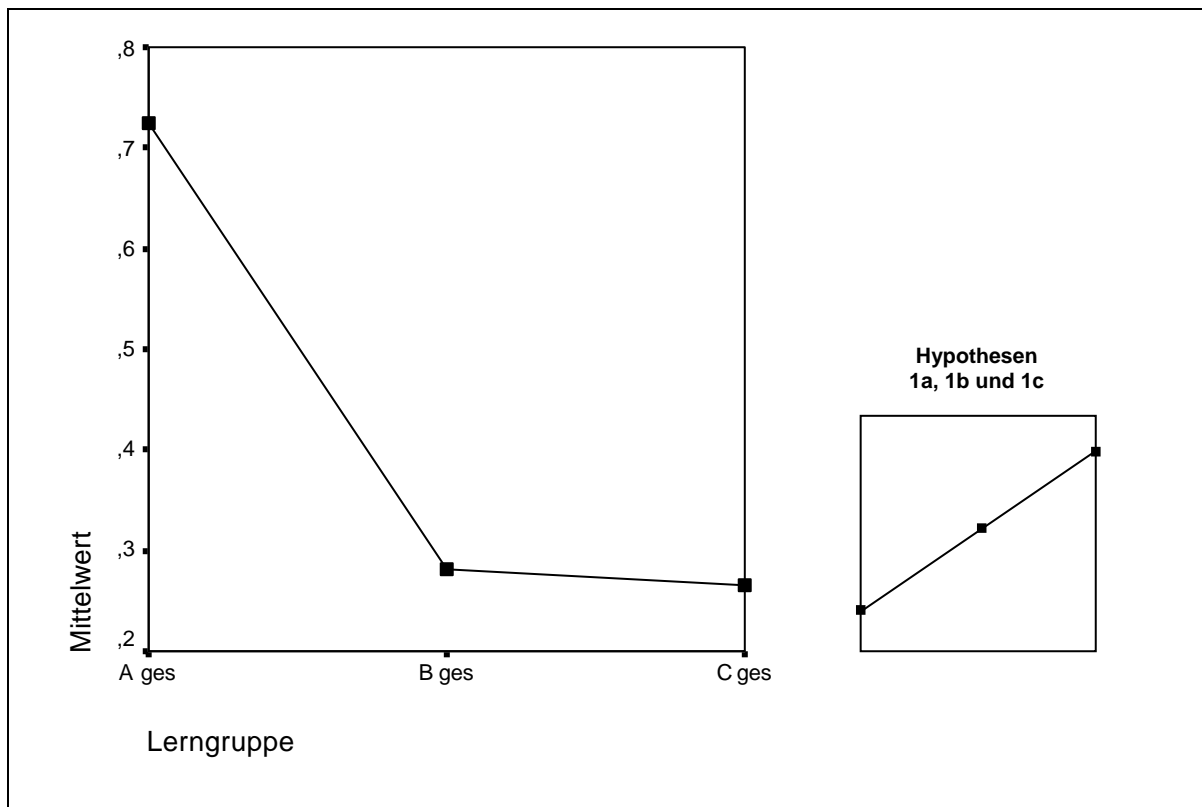


Differenz NT – VT	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	29	0,72	1,791
	<i>B ges</i>	39	0,28	1,761
	<i>C ges</i>	34	0,26	2,050

**Tab. 32:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*).

Die Lerngruppe *A ges* hat ohne Systemdiagramme gelernt. Die 29 Versuchspersonen haben die höchsten Lernzuwächse erzielt. Sie haben im Mittel einen Lernzuwachs von 0,72 Punkten erreicht (siehe Tab. 32). Die 39 Schülerinnen und Schüler der Lerngruppe *B ges*, die mit Diagrammen, jedoch ohne aktive Konstruktionen, gelernt haben, haben beim Lernzuwachs einen Mittelwert von 0,28 Punkten erzielt. Die Lerngruppe *C ges* (34 Versuchspersonen), die aktiv Systemdiagramme konstruiert hat, hat einen Mittelwert von 0,26 Punkten erreicht. Sowohl die Gruppe *A ges*, die ohne Diagramme gelernt hat, als auch die Gruppen *B ges* und *C ges*, die auf unterschiedliche Weise mit Diagrammen gearbeitet haben, zeigen in der Kategorie *Lernerfolg* nur sehr geringe Lernzuwächse. Dabei ist jedoch der größte Lernzuwachs bei den Schülerinnen und Schülern zu verzeichnen, die ohne systemische Darstellungsformen gelernt haben (vgl. Abb. 46 auf Seite 170). Der geringste Lernzuwachs ist bei Lernenden aufgetreten, die eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben.

Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 46 auf Seite 170). Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(2,99) = 0,602$ ; n.s.). Die Mittelwerte der Lernzuwächse aller drei Lerngruppen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die statistische Auswertung mit Hilfe von t-Tests ist in Tab. 33 auf Seite 170 aufgeführt.



**Abb. 46:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	t(66)=1,016 n.s.
	<i>B ges</i>	
	<i>A ges</i>	t(61)=0,939 n.s.
	<i>C ges</i>	
	<i>B ges</i>	t(71)=0,039 n.s.
	<i>C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 33:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*; t-Test).

Die Lernerfolgitems erfassen vor allem chemisches bzw. physikalisch-chemisches Wissen und allgemeines Wissen über Systeme, das als grundlegend für das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs anzusehen ist. Direkte Fragen zum System „Globaler Kohlenstoffkreislauf“ werden nicht gestellt. Die Inhalte, die als grundlegend für das Verständnis

des betrachteten Systems anzusehen sind, werden nicht ausreichend gelernt. Insgesamt werden bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* relativ wenig der maximal 13 Punkte erreicht (vgl. Kapitel 12.1.3 auf Seite 160 ff.) Vermutlich wird dieses so genannte „grundlegende Wissen“ für das Verständnis des Systems Kohlenstoffkreislauf von den Schülerinnen und Schülern als nicht interessant erachtet (vgl. Kapitel 12.2.3 auf Seite 174 ff.). *Die Hypothesen 1a, 1b und 1c zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen können demnach für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ gesamt nicht bestätigt werden.*

### 12.2.2 Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

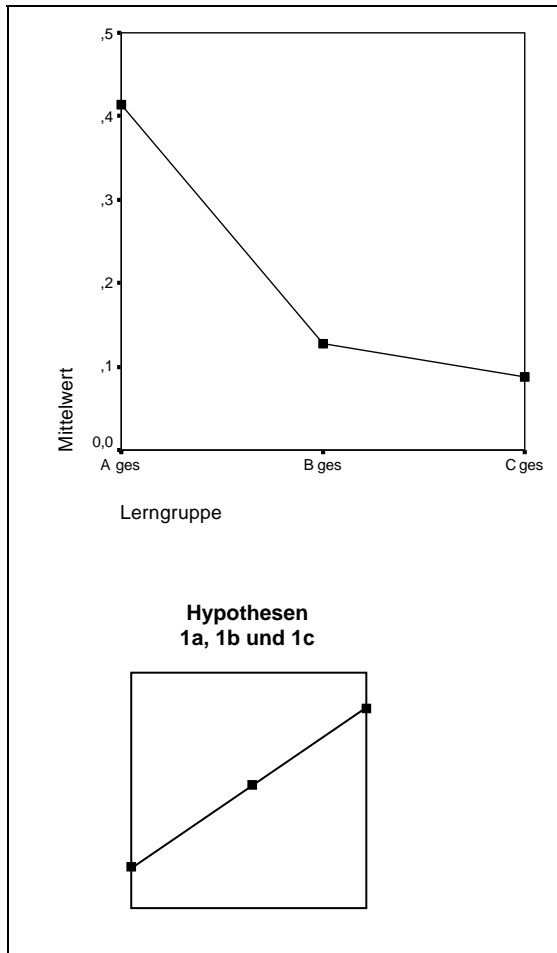
Die Frage, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen den Lernprozess positiv beeinflusst, wird nunmehr bezüglich des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* untersucht. Die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis zeigen die gleichen Tendenzen, wie sie in Kapitel 12.2.1 auf Seite 168 ff. für den gesamten Lernerfolg ermittelt werden. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 34 aufgeführt. Die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse sind in Abb. 47 und Abb. 48 auf Seite 172 dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>A ges</i>	29	0,41	1,086
	<i>B ges</i>	39	0,13	1,128
	<i>C ges</i>	34	0,09	0,996
<i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>A ges</i>	29	0,31	1,892
	<i>B ges</i>	39	0,15	1,461
	<i>C ges</i>	34	0,18	1,660

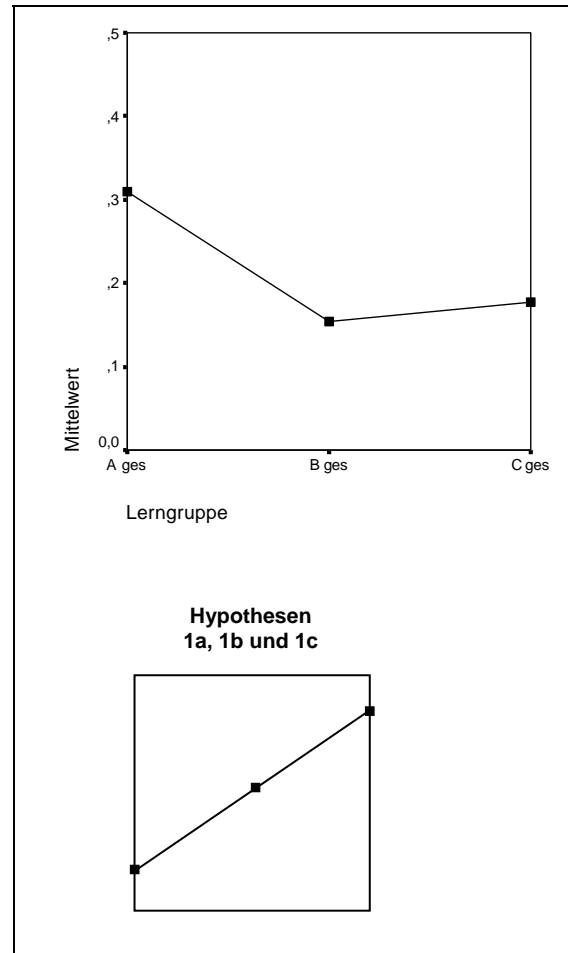
**Tab. 34:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*).

Sowohl beim Faktenwissen als auch beim Verständnis hat die Lerngruppe *A ges*, die ohne Diagramme gearbeitet hat, mit 0,41 bzw. 0,31 Punkten die höchsten Mittelwerte erreicht. Die Lerngruppe *B ges* (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption) hat beim Faktenwissen lediglich einen mittleren Lernzuwachs von 0,13 Punkten er-

zielt, Lerngruppe *C ges* (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion) einen von 0,09 Punkten. Im Gegensatz zum Faktenwissen sind die Lernzuwächse beim Verständnis im Mittel bei der Gruppe *B ges* ( $M = 0,15$ ) geringfügig größer als bei der Gruppe *C ges* ( $M = 0,18$ ).



**Abb. 47:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 48:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.

In Abb. 47 und Abb. 48 auf Seite 172 sind die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* dargestellt. Die Berechnung einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit dem Faktor *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) für die abhängige Variable *Lernzuwachs* zeigt sowohl für das Faktenwissen ( $F(2,99) = 0,846$ ; n.s.) als auch für das Verständnis ( $F(2,99) = 0,082$ ; n.s.) keinen signifikanten Haupteffekt. Die Mittelwerte der Lernzuwächse differenziert nach Faktenwissen und Verständnis aller drei Lern-

gruppen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die statistische Auswertung mit Hilfe von t-Tests für unabhängige Stichproben ist in Tab. 35 aufgeführt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>A ges</i>	t(66)=1,049 n.s.
	<i>B ges</i>	
	<i>A ges</i>	t(61)=1,240 n.s.
	<i>C ges</i>	
	<i>B ges</i>	t(71)=0,159 n.s.
	<i>C ges</i>	
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>A ges</i>	t(50,950)=0,371 n.s.
	<i>B ges</i>	
	<i>A ges</i>	t(61)=0,299 n.s.
	<i>C ges</i>	
	<i>B ges</i>	t(71)=-0,062 n.s.
	<i>C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 35:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis (t-Test).

Die Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis aller drei Lerngruppen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die allgemein sehr geringen Lernzuwächse zeigen sich sowohl bei den Faktenwissensitems als auch bei den Verständnisitems der Kategorie *Lernerfolg*. Chemisches bzw. physikalisch-chemisches Wissen und allgemeines Wissen über Systeme wird demnach auf der Ebene des Faktenwissens und der Verständnisebene nur unzureichend gelernt. Grund dafür ist vermutlich das Desinteresse der Schülerinnen und Schüler an dem so genannten „grundlegenden Wissen“ über das System Kohlenstoffkreislauf (vgl. Kapitel 12.2.1 auf Seite 168 ff.). *Die Hypothesen 1a, 1b und 1c zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen können demnach für die Kategorien „Lernerfolg – Faktenwissen“ und „Lernerfolg – Verständnis“ nicht bestätigt werden.*

### 12.2.3 Hypothesen 1a, 1b und 1c: Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

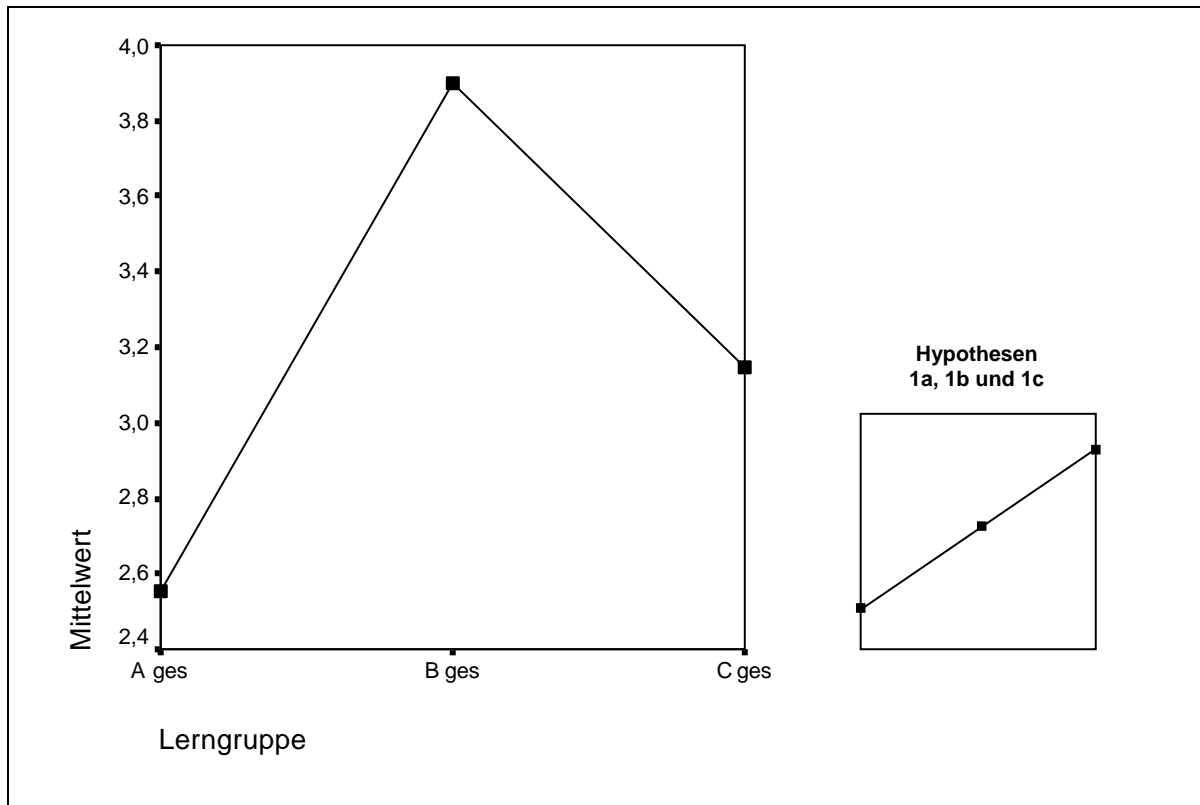
Die Frage, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen den Lernprozess positiv beeinflusst, wird hier bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* untersucht. Die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) im Nachtest werden nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen differenziert (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 36 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse in der Kategorie *System Erde* sind in Abb. 49 auf Seite 175 dargestellt.

	Lerngruppe	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	29	2,55	1,863
	<i>B ges</i>	39	3,90	2,162
	<i>C ges</i>	34	3,15	1,828

**Tab. 36:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen.

Die 39 Versuchspersonen der Lerngruppe *B ges* (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption) erzielen bei den „System Erde“-Items mit 3,90 Punkten den höchsten Mittelwert. Die Schülerinnen und Schüler, die aktiv Systemdiagramme konstruiert haben (Gruppe *C ges*) erreichen im Mittel noch 3,15 Punkte. Am schlechtesten schnitt die Lerngruppe ab, die ohne Diagramme gelernt hat (*A ges*). Sie erzielt beim Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* nur einen Mittelwert von 2,55 Punkten.

Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses der Kategorie *System Erde* im Nachtest bestehen. Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt einen signifikanten Haupteffekt ( $F(2,99) = 3,963$ ;  $p < 0,05$ ). Die Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben sind in Tab. 37 auf Seite 176 aufgeführt.



**Abb. 49:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.

Zwischen den Lerngruppen *B ges* und *C ges* kann für die mittleren Summenscores bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* kein signifikanter Unterschied ermittelt werden ( $t(71) = 1,588$ ;  $p = 0,117$ ). Das eigenständige Konstruieren der Wirkungs- und Flussdiagramme hat entgegen der Hypothese 1a zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen, keinen Vorteil gegenüber der passiven Rezeption von Diagrammen gebracht. Das Lernen mit fertigen Systemdiagrammen ist anscheinend dem Lernen mit Hilfe aktiver Konstruktionen von Diagrammen überlegen. Vielleicht ist die Lernzeit von drei mal 90 Minuten zu kurz für das Methodentraining gewesen. Die Schülerinnen und Schüler sind vielleicht stärker damit beschäftigt gewesen den Konstruktionsprozess zu erarbeiten, als die zu strukturierenden Inhalte zu verstehen. *Die Hypothese 1a ist abzulehnen.*

Zwischen den Lerngruppen *A ges* und *C ges* kann für die mittleren Summenscores bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* ebenfalls kein signifikanter Unterschied ermittelt werden ( $t(61) = -1,277$ ;  $p = 0,206$ ). Es sind jedoch Tendenzen festzustellen. *Die aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen zeigt, wie in Hypothese 1b postuliert, einen tendenziellen Vorteil gegenüber dem Lernen ohne Systemdiagramme. Auf Grund des Signifikanzniveaus kann die Hypothese 1b jedoch nicht bestätigt werden.*

Die Mittelwerte der Summenscores der Gruppen *A ges* und *B ges* unterscheiden sich jedoch hoch signifikant ( $t(66) = -2,690$ ;  $p = 0,009$ ). Demnach ist das Lernen mit fertigen Systemdiagrammen (*B ges*) dem Lernen ohne Diagramme überlegen. Damit kann die Hypothese 1c zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen für die Kategorie „System Erde“ bestätigt werden.

	Lerngruppe	Signifikanz
Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	$t(66) = -2,690^{**}$
	<i>B ges</i>	
	<i>A ges</i>	$t(61) = -1,277$ n.s.
	<i>C ges</i>	
	<i>B ges</i>	$t(71) = 1,588$ n.s.
	<i>C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 37:** Unterschiede der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*; t-Test).

#### 12.2.4 Zusammenfassung

In Kapitel 12.2 ist der Einfluss systemischer Darstellungsformen untersucht worden. Welche Form des Einsatzes von Fluss- und Wirkungsdiagrammen unterstützt den Lernprozess am stärksten? Es ist angenommen worden, dass die aktive Konstruktion dieser systemischen Darstellungsformen, der passiven Rezeption überlegen ist. Zudem ist davon ausgegangen worden, dass das Lernen mit fertigen Systemdiagrammen vorteilhafter als das Lernen ohne Diagramme ist. Bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* können die formulierten Hypothesen 1a, 1b und 1c nicht bestätigt werden. Lernerfolgitems erfassen vor allem grundlegendes Wissen aus den Bereichen Chemie bzw. Physikalische Chemie und allgemeine Systemtheorie. Fragen, die sich direkt auf die in den Lernsituationen vermittelten Inhalte zum System „Globaler Kohlenstoffkreislauf“ bezogen, sind hier nicht gestellt worden.

Bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* sind die Hypothesen 1a und 1b abzulehnen; die Hypothese 1c kann bestätigt werden. Den größten Lernzuwachs haben die Schülerinnen und Schüler erzielt, die mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen gearbeitet haben. Die passive Rezeption ist sowohl dem Lernen ohne Systemdiagramme als



auch der aktiven Diagrammkonstruktion überlegen gewesen. Ein tendenzieller Vorteil der Konstruktionsmethode gegenüber dem Verzicht auf Fluss- und Wirkungsdiagrammeinsatz kann jedoch festgestellt werden. Die Konstruktionsmethode hat die Schülerinnen und Schüler vielleicht zu sehr beschäftigt und muss vermutlich vorher über einen noch längeren Zeitraum geübt werden.

### 12.3 Einfluss mehrperspektivischen Wissens

Als zweites soll in dieser Arbeit untersucht werden, inwieweit zweidimensional repräsentiertes Wissen das Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf verbessert. Es wird der Frage nachgegangen, ob ein-perspektivisches oder zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess stärker unterstützt. Zunächst wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg gesamt* überprüft (siehe Kapitel 12.3.1 auf Seite 177 ff.). In Kapitel 12.3.2 auf Seite 179 ff. wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* untersucht, in Kapitel 12.3.3 auf Seite 181 ff. bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde*. Die bereits auf Seite 89 formulierte Hypothese lautet:

Hypothese 2                      *Schülerinnen und Schüler, die zwei-perspektivisches Lernmaterial zum System Kohlenstoffkreislauf nutzen (z. B. Klimageschichte und Rohstoffnutzung), verbessern ihr Wissen über dieses Konzept stärker als Schülerinnen und Schüler, die ein-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

#### 12.3.1 Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

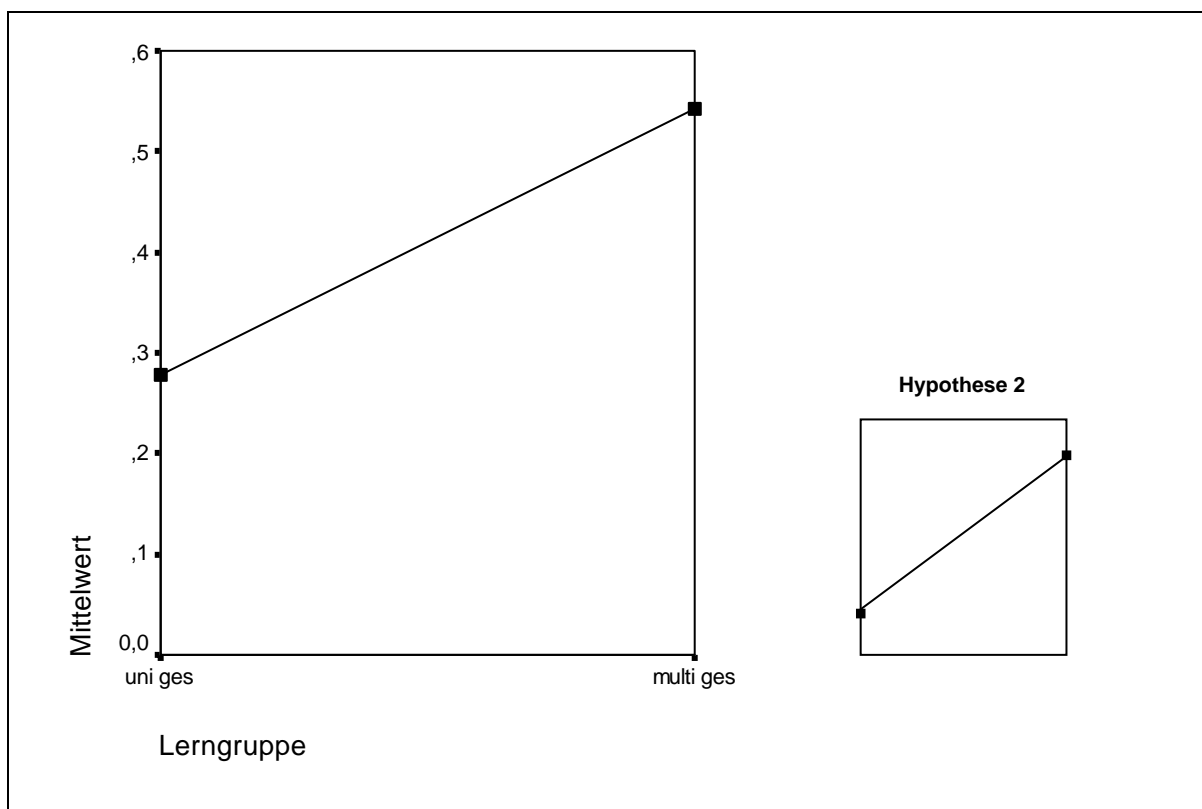
Die Frage, ob ein-perspektivisches oder zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess positiv beeinflusst, wird bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* untersucht. Die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) werden nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven differenziert (uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 38 zusammengefasst.

Die Lerngruppe *uni ges* hat ein-perspektivische Zusatzinformationen erhalten. Die 54 Versuchspersonen haben einen mittleren Lernzuwachs von 0,28 Punkten erreicht. Die Schülerinnen und Schüler der Lerngruppe *multi ges*, die mit zwei-perspektivischen Zusatzinformationen gelernt haben, haben beim Lernzuwachs einen Mittelwert von 0,54 Punkten erzielt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>uni ges</i>	54	0,28	2,032
	<i>multi ges</i>	48	0,54	1,663

**Tab. 38:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*).

Anhand eines t-Tests wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den beiden Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 50 dargestellt. Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe* (Anzahl inhaltlicher Perspektiven) für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt keinen signifikanten Effekt. Die statistische Auswertung mit Hilfe eines t-Tests ist in Tab. 39 auf Seite 179 aufgeführt.



**Abb. 50:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31; t-Test). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.

Der Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* fällt in den Gruppe *uni ges* und *multi ges* sehr gering aus. Schülerinnen und Schüler, deren Lernmaterial mit zwei-perspektivischen Vertiefungstexten ausgestattet gewesen ist, zeigen nur einen geringfügig höheren Lernzuwachs als diejenigen, die mit ein-perspektivischem Zusatzmaterial gelernt haben. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. *Hypothese 2 muss daher abgelehnt werden.*

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>uni ges</i>	t(100)=-0,712 n.s.
	<i>multi ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 39:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*; t-Test).

### 12.3.2 Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

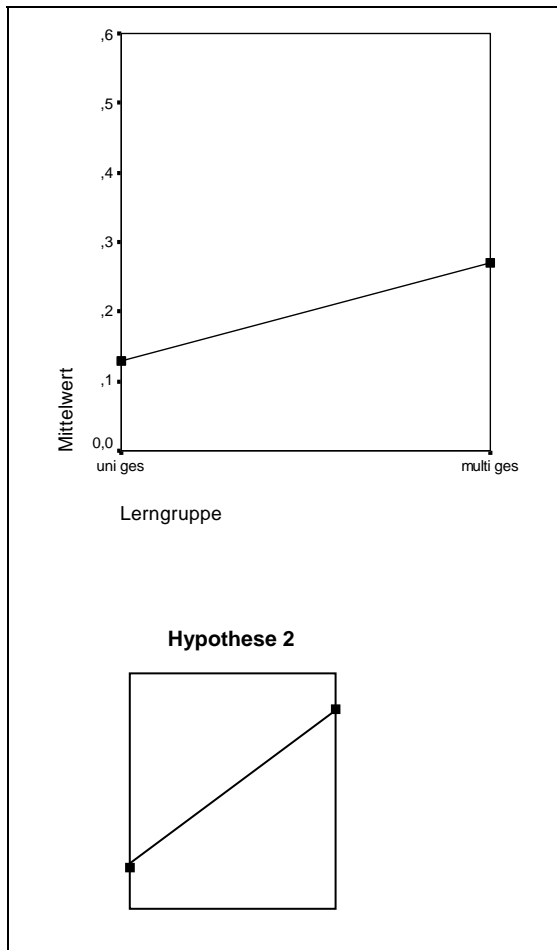
Die Frage, ob ein-perspektivisches oder zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess positiv beeinflusst, wird hier bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis untersucht. Die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis zeigen die gleichen Tendenzen, wie sie in Kapitel 12.3.1 auf Seite 177 ff. für den gesamten Lernerfolg ermittelt werden. Die Mittelwerte beim Faktenwissen ( $M = 0,13$  bzw.  $M = 0,15$ ) sind etwas kleiner als der beim Verständnis erreichte mittlere Wert ( $M = 0,27$ ). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 40 aufgeführt. Die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse sind in Abb. 51 und Abb. 52 auf Seite 180 dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>uni ges</i>	54	0,13	1,082
	<i>multi ges</i>	48	0,27	1,067
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>uni ges</i>	54	0,15	1,816
	<i>multi ges</i>	48	0,27	1,440

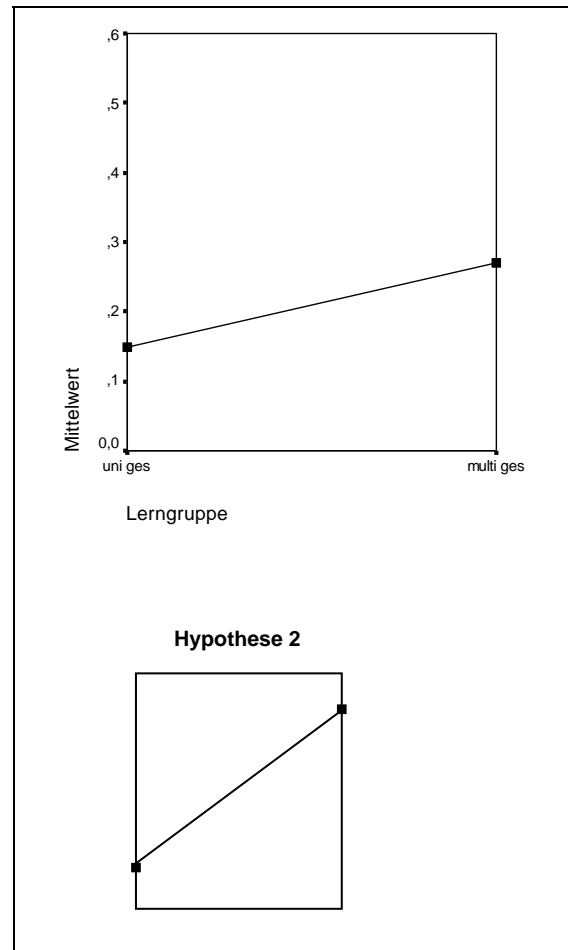
**Tab. 40:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*).

Die Berechnung eines t-Tests mit dem Faktor *Lerngruppe* (Anzahl inhaltlicher Perspektiven) für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* bzw. *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* zeigt sowohl für das Faktenwissen als auch für das Verständnis keinen signifikanten Effekt. Die statistische Auswertung mit Hilfe eines t-Tests ist in Tab. 41 auf Seite 181 aufgeführt.

Die Lernzuwächse bezüglich der Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* zeigen ein ähnliches Verhalten, wie es in Kapitel 12.3.1 auf Seite 177 ff. für die Kategorie *Lernerfolg gesamt* ermittelt wurde. Zum einen fallen sie in den beiden Gruppen *uni ges* und *multi ges* sehr gering aus; zum anderen bestätigt sich sowohl für das Faktenwissen als auch für das Verständnis der tendenzielle Vorteil von zwei-perspektivischen Vertiefungstexten. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. *Hypothese 2 muss daher abgelehnt werden.*



**Abb. 51:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22; t-Test). Unten ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 52:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31; t-Test). Unten ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>uni ges</i>	t(100)=-0,662 n.s.
	<i>multi ges</i>	
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>uni ges</i>	t(100)=-0,375 n.s.
	<i>multi ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 41:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis (t-Test).

### 12.3.3 Hypothese 2: Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

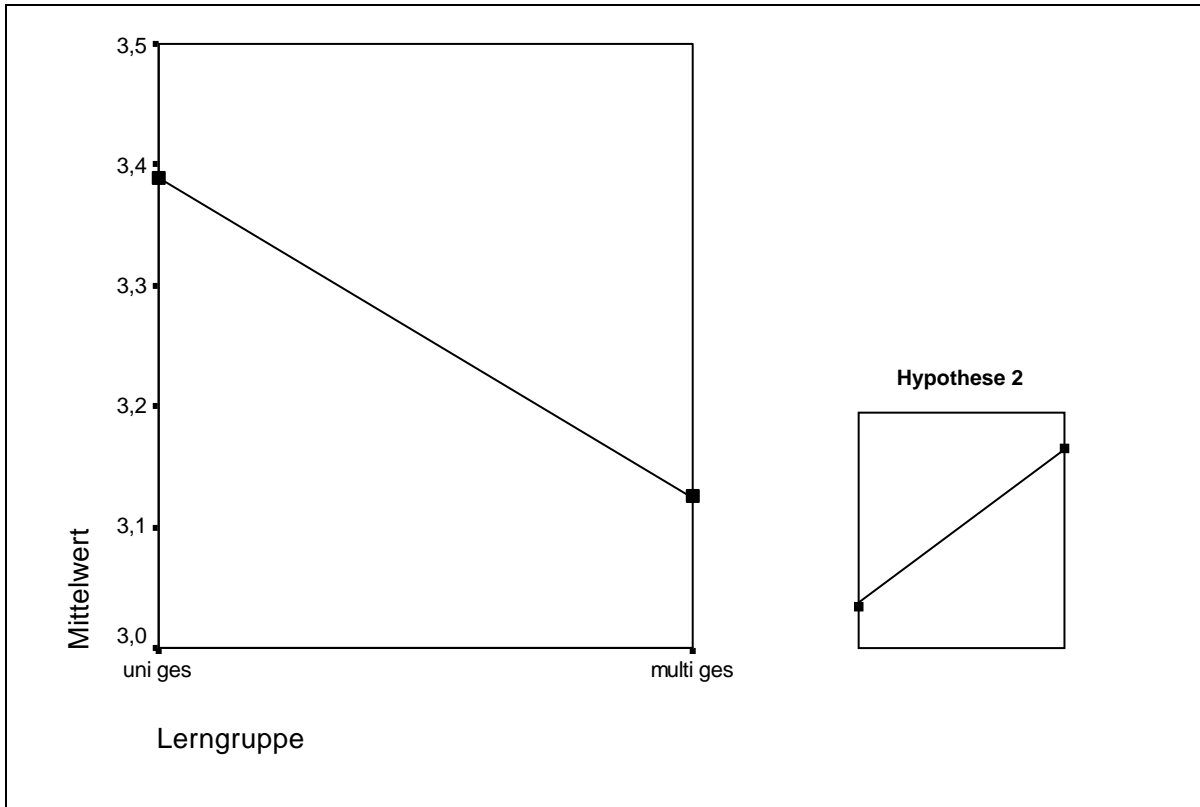
Die Frage, ob ein-perspektivisches oder zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess positiv beeinflusst, wird hier bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* untersucht. Die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) im Nachtest werden nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven differenziert (uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 42 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 53 auf Seite 182 dargestellt. Die 54 Versuchspersonen der Lerngruppe *uni ges* (uni-perspektivisch) haben bei den *System Erde*-Items mit 3,39 Punkten einen geringfügig höheren Mittelwert als diejenigen der Gruppe *multi ges* (zwei-perspektivisch) erzielt.

	Lerngruppe	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>uni ges</i>	54	3,39	2,141
	<i>multi ges</i>	48	3,13	1,909

**Tab. 42:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven.

Anhand eines t-Tests wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den beiden Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses der Kategorie *System Erde* im Nachtest bestehen (siehe Abb. 53 auf Seite 182). Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe (Anzahl inhaltlicher Perspektiven)* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt keinen signifikanten Effekt. Das Ergebnis des t-Tests ist in Tab. 43 auf Seite 182 aufgeführt.

Der Lernzuwachs bezüglich der Kategorie *System Erde* fällt im Vergleich zum Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* (siehe Kapitel 12.3.1 und 0) in den beiden Gruppe *uni ges* und *multi ges* relativ groß aus. Entgegen der Annahme deutet sich jedoch ein tendenzieller Vorteil von ein-perspektivischen Vertiefungstexten an. Die Lernzuwächse bezüglich der Kategorie *System Erde* in den Gruppen *uni ges* und *multi ges* unterscheiden sich jedoch nur sehr schwach. Der Unterschied ist nicht signifikant. *Hypothese 2 muss daher abgelehnt werden.*



**Abb. 53:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44; t-Test). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.

	Lerngruppe	Signifikanz
Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>uni ges</i>	t(100)=0,654 n.s.
	<i>multi ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 43:** Unterschiede der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*; t-Test).

#### 12.3.4 Zusammenfassung

In Kapitel 12.3 ist untersucht worden, inwieweit zweidimensional repräsentiertes Wissen das Lernen über das System Kohlenstoffkreislauf fördert. Es ist der Frage nachgegangen worden, ob zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess stärker unterstützt als einperspektivisches? Die Unterschiede bei den Lernzuwächsen in den Kategorien *Lernerfolg* und *System Erde* sind relativ gering ausgefallen. Zwischen den Lerngruppen, die mit ein- bzw. zwei-perspektivischem Material gearbeitet haben, sind keine signifikanten Unterschiede aufgetreten. Die Hypothese 2 ist daher abzulehnen.

#### 12.4 Kombiniertes Einfluss systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens

Als drittes soll in dieser Arbeit untersucht werden, inwieweit systemische Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagramme) in Verbindung mit mehrperspektivisch repräsentiertem Wissen das Lernen über das System Kohlenstoffkreislauf fördern. Zunächst wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg gesamt* überprüft (siehe Kapitel 12.4.1 auf Seite 184 ff.). In Kapitel 12.4.2 auf Seite 186 ff. wird diese Frage bezüglich des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* untersucht, in Kapitel 12.4.3 auf Seite 190 ff. bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde*. Die bereits auf Seite 90 f. formulierten Hypothesen lauten:

Hypothese 3a      *Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 3b      *Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.*

### 12.4.1 Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Die Frage, wie die verschiedenen Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und die unterschiedliche Anzahl inhaltlicher Perspektiven kombiniert werden müssen, um den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf zu unterstützen, wird an dieser Stelle bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* untersucht. Die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) werden nach allen sechs Lerngruppen differenziert (*A 1*, *B 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 44 auf Seite 184 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 54 auf Seite 185 dargestellt.

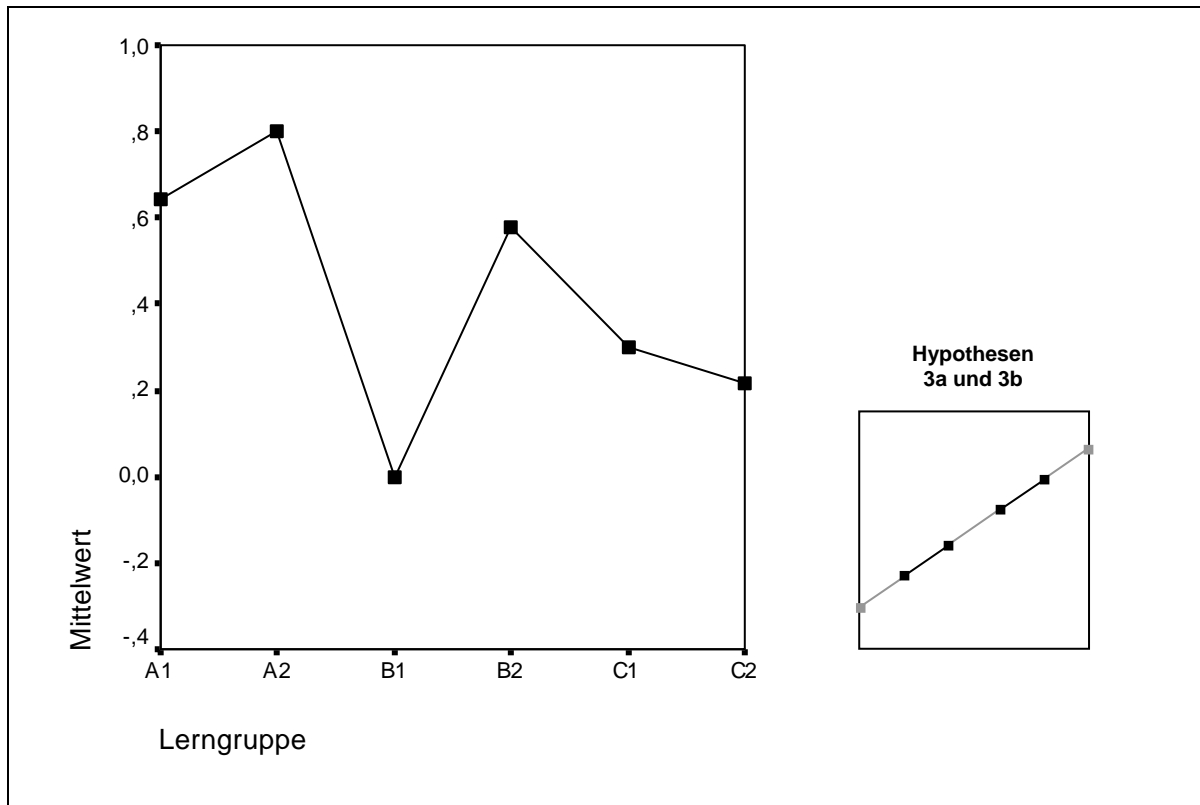
Wie schon in Kapitel 12.1.3 auf Seite 160 ff. ersichtlich wird, sind die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* relativ gering. Die Mittelwerte reichen von null Punkten bei der Lerngruppe *B 1* bis zu 0,80 Punkten bei der Lerngruppe *A 2* (siehe Tab. 44). Die Standardabweichung ist vor allem bei der Lerngruppe *C 1* relativ hoch.

	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i>	14	0,64	1,946
	<i>A 2</i>	15	0,80	1,699
	<i>B 1</i>	20	0,00	1,654
	<i>B 2</i>	19	0,58	1,865
	<i>C 1</i>	20	0,30	2,452
	<i>C 2</i>	14	0,21	1,369

**Tab. 44:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen.

Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 54 auf Seite 185). Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe* für die abhängige Variable *Lernzuwachs* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(5,96) = 0,432$ ; n.s.). Die Mittelwerte der Lernzuwächse aller sechs Lerngruppen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die statistische Auswertung mit Hilfe von t-Tests ist in Tab. 45 auf Seite 186 aufgeführt.





**Abb. 54:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt.

Die Lernzuwächse bezüglich der Kategorie *Lernerfolg* in den beiden Gruppe C 1 (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion und uni-perspektivisch) und B 2 (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und zwei-perspektivisch) unterscheiden sich nur relativ gering. *Hypothese 3a muss daher abgelehnt werden.*

Der Unterschied zwischen den Lernzuwächsen der beiden Gruppen B 1 (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und uni-perspektivisch) und A 2 (ohne Diagramme und zwei-perspektivisch) ist ebenfalls relativ gering. Entgegen der Annahme deutet sich ein tendenzieller Vorteil von zwei-perspektivischen Vertiefungstexten im Gegensatz zu uni-perspektivischen Texten in Verbindung mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen an. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. *Hypothese 3b muss daher abgelehnt werden.*

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i>	<i>A 2</i>	<i>B 1</i>	<i>B 2</i>	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>
<i>A 1</i>	-	t(27)= -0,232 n.s.	t(32)= 1,037 n.s.	t(31)= 0,096 n.s.	t(32)= 0,435 n.s.	t(26)= 0,674 n.s.
<i>A 2</i>	-	-	t(33)= 1,400 n.s.	t(32)= 0,357 n.s.	t(33)= 0,676 n.s.	t(27)= 1,018 n.s.
<i>B 1</i>	-	-	-	t(37)= -1,027 n.s.	t(38)= -0,454 n.s.	t(32)= -0,398 n.s.
<i>B 2</i>	-	-	-	-	t(37)= 0,398 n.s.	t(31)= 0,618 n.s.
<i>C 1</i>	-	-	-	-	-	t(32)= 0,118 n.s.
<i>C 2</i>	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 45:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31; t-Test).

#### 12.4.2 Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

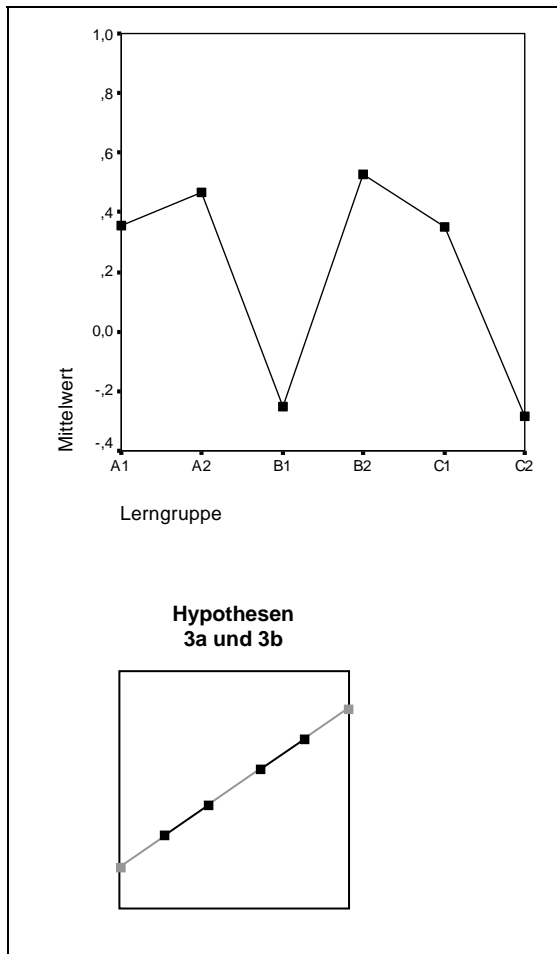
Die Frage, wie die verschiedenen Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und die unterschiedliche Anzahl inhaltlicher Perspektiven kombiniert werden müssen, um den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf zu unterstützen, wird hier bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis untersucht. Die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis zeigen die gleichen Tendenzen, wie sie in Kapitel 12.4.1 für den gesamten Lernerfolg ermittelt worden sind. Der höchste Mittelwert ( $M = 0,53$ ) und auch die geringsten Mittelwerte ( $M = -0,25$  bzw.  $M = -0,29$ ) treten beim Faktenwissen auf. Letzteres bedeutet, dass Faktenwissen auch vergessen worden ist. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 46 aufgeführt. Die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse bezüglich des Lernerfolgs in den Kategorien *Faktenwissen* und *Verständnis* sind in Abb. 55 und Abb. 56 auf Seite 188 dargestellt.

	Lerngruppe	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>A 1</i>	14	0,36	1,082
	<i>A 2</i>	15	0,47	1,125
	<i>B 1</i>	20	-0,25	1,070
	<i>B 2</i>	19	0,53	1,073
	<i>C 1</i>	20	0,35	1,040
	<i>C 2</i>	14	-0,29	0,825
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>A 1</i>	14	0,29	2,128
	<i>A 2</i>	15	0,33	1,718
	<i>B 1</i>	20	0,25	1,517
	<i>B 2</i>	19	0,05	1,433
	<i>C 1</i>	20	-0,05	1,932
	<i>C 2</i>	14	0,50	1,160

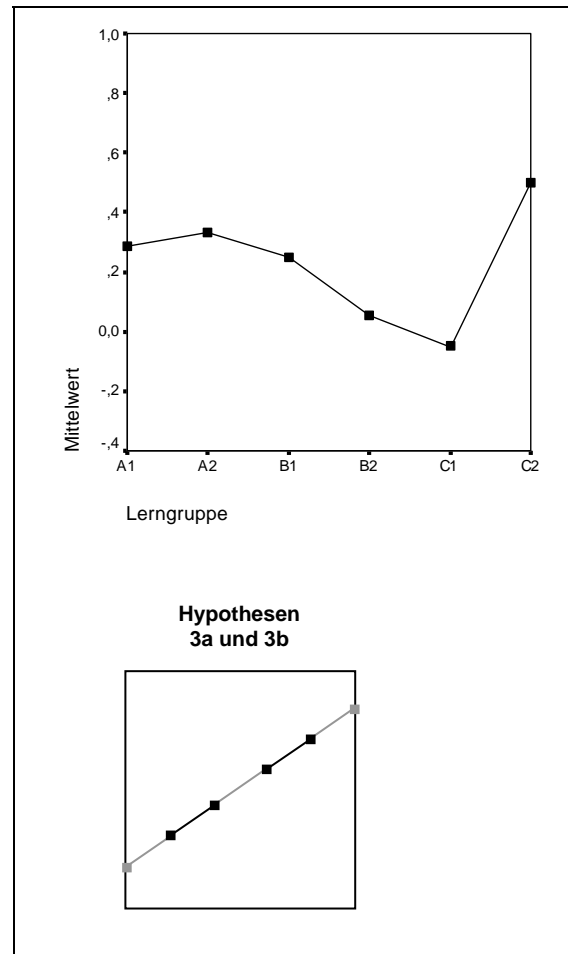
**Tab. 46:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen.

Die Berechnung einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit dem Faktor *Lerngruppe* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* zeigt einen schwach signifikanten Haupteffekt ( $F(5,96) = 2,068$ ;  $p=0,077$ ), für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* jedoch keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(5,96) = 0,238$ ; n.s.). Die statistischen Auswertungen mit Hilfe von t-Tests sind in Tab. 47 auf Seite 189 und Tab. 48 auf Seite 189 aufgeführt.

Die Lernzuwächse in den beiden Gruppe *C 1* (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion und uni-perspektivisch) und *B 2* (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und zwei-perspektivisch) unterscheiden sich sowohl beim Faktenwissen als auch beim Verständnis nur relativ gering. Die Unterschiede sind nicht signifikant. *Hypothese 3a muss daher abgelehnt werden.*



**Abb. 55:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 56:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt.

Der Unterschied zwischen den Lernzuwächsen der beiden Gruppen B 1 (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und uni-perspektivisch) und A 2 (ohne Diagramme und zwei-perspektivisch) ist ebenfalls relativ gering. Entgegen der Annahme deutet sich jedoch beim Faktenwissen ein tendenzieller Vorteil von zwei-perspektivischen Vertiefungstexten im Gegensatz zu uni-perspektivischen Texten in Verbindung mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen an. Dieser Unterschied ist schwach signifikant ( $t(33) = 1,918$ ;  $p = 0,064$ ). *Hypothese 3b muss daher abgelehnt werden.*

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg – Fakten- wissen (Item 19 – 22)</i>	A 1	A 2	B 1	B 2	C 1	C 2
A 1	-	t(27)= -0,267 n.s.	t(32)= 1,621 n.s.	t(31)= -0,446 n.s.	t(32)= 0,019 n.s.	t(26)= 1,768°
A 2	-	-	t(33)= 1,918°	t(32)= -0,158 n.s.	t(33)= 0,317 n.s.	t(25,622)= 2,062*
B 1	-	-	-	t(37)= -2,261*	t(38)= -1,798°	t(32)= 0,105 n.s.
B 2	-	-	-	-	t(37)= 0,521 n.s.	t(31)= 2,360*
C 1	-	-	-	-	-	t(32)= 1,903°
C 2	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 47:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22; t-Test).

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg – Ver- ständnis (Item 23 – 31)</i>	A 1	A 2	B 1	B 2	C 1	C 2
A 1	-	t(27)= -0,067 n.s.	t(32)= 0,057 n.s.	t(31)= 0,376 n.s.	t(32)= 0,478 n.s.	t(26)= -0,331 n.s.
A 2	-	-	t(33)= 0,152 n.s.	t(27,210)= 0,508 n.s.	t(33)= 0,608 n.s.	t(24,677)= -0,308 n.s.
B 1	-	-	-	t(37)= 0,417 n.s.	t(38)= 0,546 n.s.	t(32)= -0,519 n.s.
B 2	-	-	-	-	t(37)= 0,188 n.s.	t(31)= -0,958 n.s.
C 1	-	-	-	-	-	t(32)= -0,949 n.s.
C 2	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 48:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31; t-Test).

### 12.4.3 Hypothesen 3a und 3b: Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

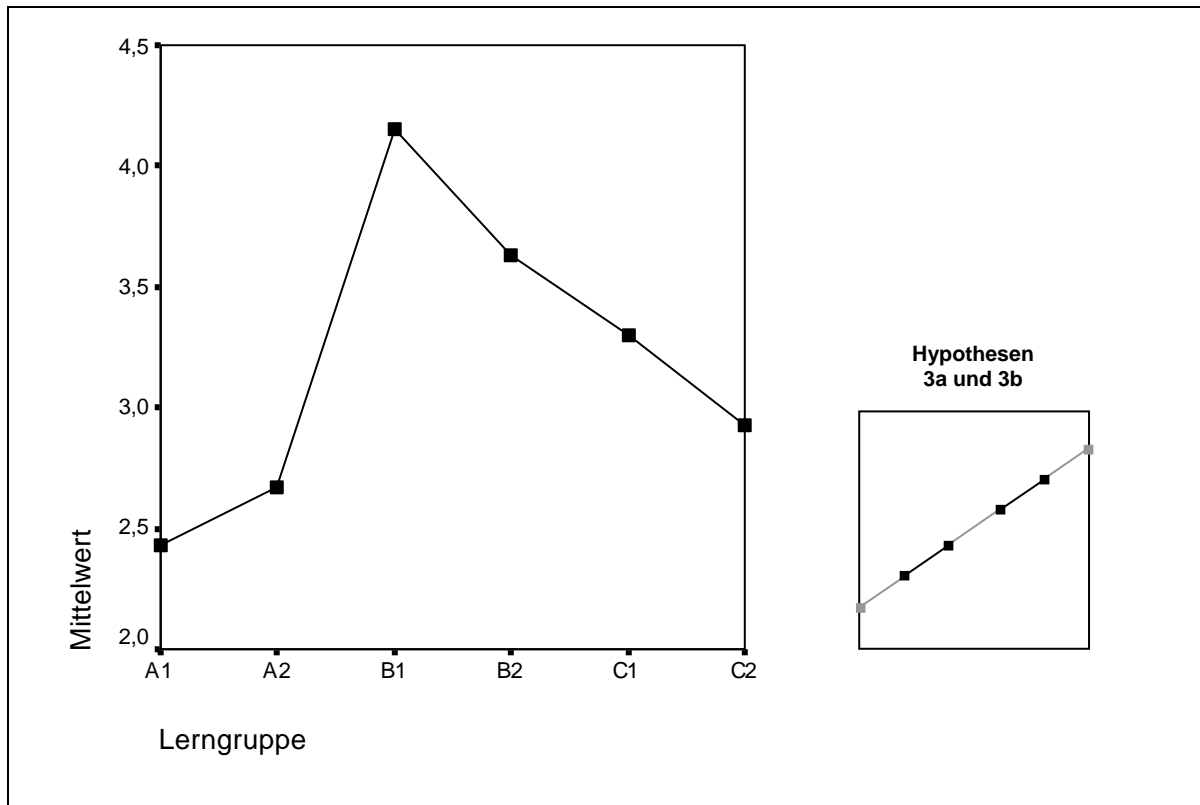
Die Frage, wie die verschiedenen Formen des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und die unterschiedliche Anzahl inhaltlicher Perspektiven kombiniert werden müssen, um den Wissenserwerb bezüglich des Systems Kohlenstoffkreislauf zu unterstützen, wird auch bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* untersucht. Die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) im Nachtest werden nach allen sechs Lerngruppen differenziert (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 49 auf Seite 190 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche der Lernzuwächse sind in Abb. 57 auf Seite 191 dargestellt.

Die 20 Versuchspersonen der Lerngruppen *B 1* haben bei den *System Erde*-Items mit 4,15 Punkten den höchsten Mittelwert erzielt. Die Gruppe *B 2*, die ebenfalls mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen gelernt hat, erreicht den zweithöchsten Mittelwert ( $M = 3,63$ ). Die Lerngruppen *A 1* und *A 2*, die ohne Systemdiagramme gearbeitet haben, sind mit 2,43 bzw. 2,67 Punkten durch die geringsten Mittelwerte gekennzeichnet. Die Gruppen *C 1* und *C 2*, die eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben, erzielen im Mittel 3,30 bzw. 2,93 Punkte.

	Lerngruppe	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A 1</i>	14	2,43	1,651
	<i>A 2</i>	15	2,67	2,093
	<i>B 1</i>	20	4,15	2,231
	<i>B 2</i>	19	3,63	2,114
	<i>C 1</i>	20	3,30	2,155
	<i>C 2</i>	14	2,93	1,269

**Tab. 49:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen.

Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen *A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores der Kategorie *System Erde* im Nachtest bestehen. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 57 auf Seite 191 dargestellt. Die Berechnung mit dem Faktor *Lerngruppe* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt keinen signifikanten Effekt, jedoch eine Tendenz ( $F(5,96) = 1,764$ ;  $p = 0,128$ ). Das Ergebnis des t-Tests ist in Tab. 50 auf Seite 192 aufgeführt.



**Abb. 57:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt.

Die Lernzuwächse in den beiden Gruppen B 2 (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und zwei-perspektivisch) und C 1 (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion und uni-perspektivisch) unterscheiden sich nur relativ gering. Es zeigt sich ein tendenzieller Vorteil des Lernens mit fertigen Systemdiagrammen und zwei-perspektivischem Lernmaterial gegenüber dem aktiven Konstruieren von Fluss- und Wirkungsdiagrammen in Verbindung mit ein-perspektivischen Vertiefungstexten. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. *Hypothese 3a muss daher abgelehnt werden.*

Die Lerngruppen A 2 (ohne Diagramme und zwei-perspektivisch) und B 1 (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption und uni-perspektivisch) unterscheiden sich in ihren Lernzuwächsen in der Kategorie *System Erde* schwach signifikant ( $t(33) = -1,998$ ;  $p = 0,054$ ). Das Lernen mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen in Verbindung mit uni-perspektivischen Vertiefungstexten ist in Bezug auf die Kategorie *System Erde* vorteilhafter, als das Lernen ohne Diagramme jedoch mit zwei-perspektivischem Lernmaterial. Die *Hypothese 3b kann somit bezogen auf den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ bestätigt werden.*

Summenscore <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	A 1	A 2	B 1	B 2	C 1	C 2
A 1	-	t(26,300)=-0,341 n.s.	t(32)=-2,451*	t(31)=-1,767°	t(32)=-1,272 n.s.	t(24,386)=-0,899 n.s.
A 2	-	-	t(33)=-1,998°	t(32)=-1,327 n.s.	t(33)=-0,871 n.s.	t(23,304)=-0,411 n.s.
B 1	-	-	-	t(37)=0,744 n.s.	t(38)=1,226 n.s.	t(30,957)=2,025°
B 2	-	-	-	-	t(37)=0,485 n.s.	t(29,982)=1,188 n.s.
C 1	-	-	-	-	-	t(31,272)=0,630 n.s.
C 2	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 50:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen (t-Test).

#### 12.4.4 Zusammenfassung

In Kapitel 12.4 ist der kombinierte Einsatz systemische Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens über das System *Kohlenstoffkreislauf* untersucht worden. Es ist angenommen worden, dass Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Material nutzen, ihr Wissen über das System *Kohlenstoffkreislauf* stärker verbessern als Lernende, die fertige Diagramme und zwei-perspektivisches Material nutzen. Die Hypothese 3a kann sowohl für die Kategorie *Lernerfolg*, in der grundlegendes physikalisch-chemisches und systemtheoretisches Wissens vereint wird, als auch für die Kategorie *System Erde*, die direkte Fragen zum Kohlenstoffkreislauf umfasst, nicht bestätigt werden. In beiden Kategorien sind die Unterschiede zwischen den betreffenden Gruppen (B 2 und C 1) gering.

Es ist zudem angenommen worden, dass Schülerinnen und Schüler, die fertige Systemdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über den Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern als Lernende, die mit zwei-perspektivischem Material jedoch ohne Diagramme arbeiten. Diese Hypothese (3b) muss für die Kategorie *Lernerfolg* abgelehnt werden. Für die Kategorie *System Erde* kann die Hypothese bestätigt werden. Der Einsatz fertiger Systemdiagramme wirkt sich in Verbindung mit uni-perspektivischem Lernmaterial auf das Lernen der zentralen Aspekte des Systems *Kohlenstoffkreislauf* positiver aus, als die Verwendung zwei-perspektivischen Materials ohne Systemdiagramme.



## 12.5 Einfluss des Vorwissens

In dieser Arbeit sollte auch untersucht werden, inwieweit das Vorwissen einen Einfluss auf das Lernen mit systemischen Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagrammen) und den Umgang mit mehrperspektivisch repräsentiertem Wissen über das System *Kohlenstoffkreislauf* hat. Um der Frage nachgehen zu können, wird zunächst eine Clusteranalyse zur Einteilung der Versuchspersonen in zwei Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensgrad (*gering* vs. *hoch*) vorgestellt (siehe Kapitel 12.5.1 auf Seite 194 f.). Im Anschluss wird die Frage nach der generellen Vorwissensabhängigkeit untersucht (siehe 12.5.2 auf Seite 196). Die bereits auf Seite 91 formulierte Hypothese lautet:

Hypothese 4a      *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.*

In Kapitel 12.5.3 auf Seite 197 ff. wird die obige Frage bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen (*mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) untersucht. Es wurden folgende Hypothesen formuliert:

Hypothese 4b      *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren.*

Hypothese 4c      *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.*

Anschließend wird die oben formulierte Frage bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) analysiert (siehe Kapitel 12.5.4 auf Seite 208 ff.). Die Hypothesen lauten:

Hypothese 4d      *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 4e      *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker, wenn sie ein-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

In Kapitel 12.5.5 auf Seite 217 ff. wird der Frage nachgegangen, inwieweit das Vorwissen einen Einfluss auf die Kombination des Einsatzes systemischer Darstellungsformen mit der Verwendung mehrperspektivischen Lernmaterials hat. Die Hypothesen lauten:

Hypothese 4f *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

Hypothese 4g *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System „Kohlenstoffkreislauf“ stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.*

### 12.5.1 Clusteranalyse zur Einteilung der Versuchspersonen in Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensgrad

Um die 102 Versuchspersonen in zwei Gruppen einzuteilen, die sich signifikant in ihrem Vorwissen unterscheiden, werden die Summenscores des Vorwissens im Vortest einer Clusteranalyse unterzogen. Die deskriptiven Statistiken für die beiden resultierenden Gruppen *Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen* sind in Tab. 51 und Tab. 52 aufgeführt. Die beiden Gruppen unterscheiden sich in der Anzahl der zugeordneten Versuchspersonen. Der Cluster, dem die Personen mit geringem Vorwissen zugeordnet werden, umfasst eine Teilpopulation von etwa 66 % der Gesamtstichprobe. Der Cluster *Hohes Vorwissen* schließt dagegen nur etwa 34 % der Personen der Gesamtstichprobe ein. Die Versuchspersonen des Clusters *Geringes Vorwissen* haben im Vortest null bis fünf Punkte erreicht, Personen des Clusters *Hohes Vorwissen* mehr als fünf Punkte.

<i>Geringes Vorwissen</i>	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Vorwissen</i> (Item 1 – 18)	67	3,30	1,393	0	5

**Tab. 51:** Deskriptive Statistik für die Gruppe *Geringes Vorwissen*.

<i>Hohes Vorwissen</i>	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Vorwissen</i> (Item 1 – 18)	35	7,94	1,697	6	13

**Tab. 52:** Deskriptive Statistik für die Gruppe *Hohes Vorwissen*.

Die Verteilung der Versuchspersonen mit geringem bzw. hohem Vorwissen auf die verschiedenen Lerngruppen ist in Tab. 53, Tab. 54 und Tab. 55 dargestellt. Bezüglich des geringen Vorwissens werden die sechs Lerngruppen von minimal acht und maximal neun Schülerinnen und Schülern belegt, bezüglich des hohen Vorwissens von minimal vier und maximal zehn Versuchspersonen. Die Schülerinnen und Schüler sind ebenfalls angemessen auf die drei Gruppen *A ges*, *B ges* und *C ges*, die sich in der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen unterscheiden, und die beiden Gruppen *uni ges* und *multi ges*, die sich in der Anzahl der inhaltlichen Perspektiven unterscheiden, verteilt.

	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	<b>Gesamt</b>
<i>A 1</i>	8	6	14
<i>A 2</i>	10	5	15
<i>B 1</i>	16	4	20
<i>B 2</i>	14	5	19
<i>C 1</i>	10	10	20
<i>C 2</i>	9	5	14
<b>Gesamt</b>	67	35	<b>102</b>

**Tab. 54:** Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe.

	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	<b>Gesamt</b>
<i>A ges</i>	18	11	29
<i>B ges</i>	30	9	39
<i>C ges</i>	19	15	34
<b>Gesamt</b>	67	35	<b>102</b>

**Tab. 53:** Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe – Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen.

	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	<b>Gesamt</b>
<i>uni ges</i>	34	20	54
<i>multi ges</i>	33	15	48
<b>Gesamt</b>	67	35	<b>102</b>

**Tab. 55:** Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe – Anzahl der inhaltlichen Perspektiven.

## 12.5.2 Hypothese 4a: Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs

### 12.5.2.1 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erzielen wie angenommen im Mittel einen höheren Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* ( $M = 0,69$ ) als diejenigen mit geringem Vorwissen ( $M = 0,25$ ). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 56 dargestellt. Der Mittelwertunterschied ist jedoch relativ gering und nicht signifikant ( $t(97,541) = -1,288$ ;  $p = 0,201$ ). *Hypothese 4a zur generellen Vorwissensabhängigkeit muss daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ abgelehnt werden.*

Differenz NT – VT	Vorwissen	N	M	SD	Min	Max
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	gering	67	0,25	2,099	-5	8
	hoch	35	0,69	1,278	-2	3

**Tab. 56:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad.

### 12.5.2.2 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Der Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* wird hier differenziert nach dem Faktenwissen und dem Verständnis untersucht. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 57 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Vorwissen in erster Linie den Verständniserwerb positiv beeinflusst. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen in der Kategorie *Verständnis* einen größeren Mittelwert ( $M = 0,51$ ) als diejenigen mit geringem Vorwissen ( $M = 0,04$ ).

Differenz NT – VT	Vorwissen	N	M	SD	Min	Max
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	gering	67	0,21	1,135	-2	2
	hoch	35	0,17	0,954	-2	2
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	gering	67	0,04	1,821	-6	6
	hoch	35	0,51	1,197	-2	3

**Tab. 57:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad sowie dem Faktenwissen und Verständnis.

Für den Lernzuwachs im Faktenwissen spielt das Vorwissen anscheinend nur eine geringe Rolle. Versuchspersonen, die dem Cluster *Geringes Vorwissen* zugeordnet worden sind, erzielen in der Kategorie *Faktenwissen* einen Mittelwert von 0,21 Punkten, Personen des Clusters *Hohes Vorwissen* einen Wert von 0,17 Punkten. Die Mittelwertunterschiede der Lernzuwächse in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* ( $t(80,254) = 0,176$ ;  $p = 0,860$ ) und *Lernerfolg – Verständnis* ( $t(100) = -1,376$ ;  $p = 0,172$ ) sind jedoch nicht signifikant. *Hypothese 4a zur generellen Vorwissensabhängigkeit muss daher für den Lernzuwachs in den Kategorien „Lernerfolg – Faktenwissen“ und „Lernerfolg – Verständnis“ abgelehnt werden.*

### 12.5.2.3 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen wie angenommen einen größeren Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* ( $M = 3,63$ ) als diejenigen mit geringem Vorwissen ( $M = 3,07$ ). Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 58 dargestellt. Der Mittelwertunterschied ist jedoch nicht signifikant ( $t(100) = -1,314$ ;  $p = 0,192$ ). *Die Hypothese 4a kann somit für den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ nicht bestätigt werden.*

	Vorwissen	N	M	SD	Min	Max
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	gering	67	3,07	1,877	0	7
	hoch	35	3,63	2,276	0	10

**Tab. 58:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad.

### 12.5.3 Hypothese 4b und 4c: Einfluss des Vorwissens bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen

#### 12.5.3.1 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Der Einfluss des Vorwissens wird hier in Bezug auf den Einsatz systemischer Darstellungsformen näher untersucht. Der Lernzuwachs (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest in der Kategorie *Lernerfolg*) wurde nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab.59 auf Seite 198, die Mittelwertvergleiche in Abb. 58 auf Seite 199 dargestellt.

In den Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges*, die sich hinsichtlich des Einsatzes von Systemdiagrammen unterscheiden, haben die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen im Mittel einen größeren Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* als diejenigen mit geringem Vorwissen erreicht. In der Gruppe *A ges* (ohne Diagramme) wird von den Versuchspersonen mit hohem Vorwissen ein Mittelwert von 1,09 Punkten, von denen mit geringem ein Mittelwert von 0,50 Punkten erzielt. Der mittlere Lernzuwachs in der Gruppe *B ges* (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption) ist bei den Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen um 0,65 Punkte größer als bei denen mit geringem Vorwissen. Bei der Gruppe *C ges* (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion) unterscheiden sich die Mittelwerte der Lernzuwächse zwischen denen mit hohem und denen mit geringem Vorwissen lediglich um 0,12 Punkte. Sowohl bei den Schülerinnen und Schülern mit hohem als auch bei denen mit geringem Vorwissen werden im Mittel die größten Lernzuwächse in der Gruppe erzielt, die ohne Systemdiagramme gelernt hat (vgl. Kapitel 12.2.1 auf Seite 168 ff.).

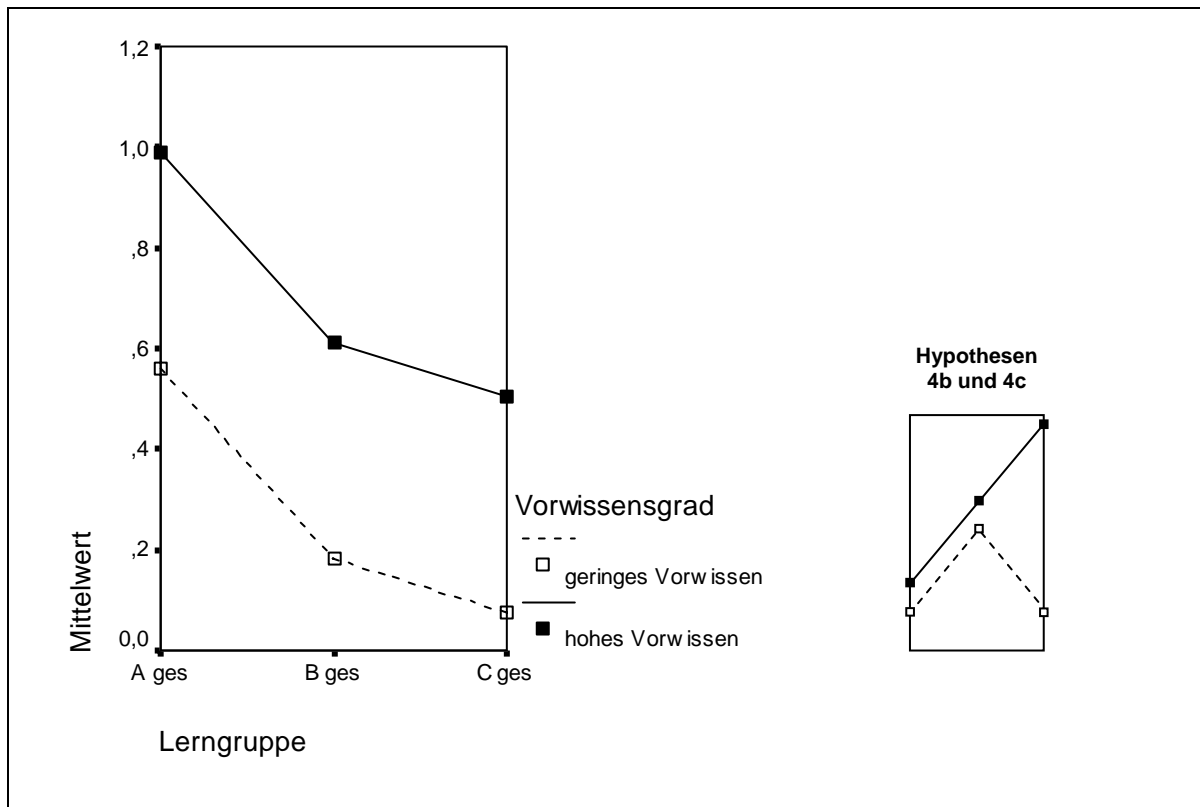
Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	gering	18	0,50	2,065
		hoch	11	1,09	1,221
	<i>B ges</i>	gering	30	0,13	1,907
		hoch	9	0,78	1,093
	<i>C ges</i>	gering	19	0,21	2,485
		hoch	15	0,33	1,397

**Tab.59:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (univariaten Varianzanalyse) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 58 auf Seite 199). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt bezüglich des Vorwissens keinen signifikanten Effekt ( $F(1,98) = 1,174$ ;  $p = 0,281$ ). Das Vorwissen scheint somit keinen Einfluss auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* zu haben.

Der Einfluss der Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen: *ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(2,98) = 0,576$ ; n.s.).

Die Lernumgebung hat demnach auch keinen Einfluss auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*. Die Einzelvergleiche der Mittelwerte ergeben innerhalb der Gruppe mit hohem Vorwissen und der mit geringem Vorwissen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 60 auf Seite 200 aufgeführt.



**Abb. 58:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.

Entgegen den Annahmen erzielen sowohl die Schülerinnen und Schüler mit geringem als auch diejenigen mit hohem Vorwissen den höchsten Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*, wenn sie ohne Systemdiagramme gelernt haben. Die Lernerfolgitems erheben das Wissen über grundlegende Fachinhalte. Sie basieren nicht direkt auf die Themen, die innerhalb der Lernsitzen in den Aufgaben zu bearbeiten waren. Demgegenüber beziehen sich die aktive Diagrammkonstruktion und die passive Rezeption von Diagrammen ganz konkret auf die Inhalte der Aufgaben. In Bezug auf das so genannte Begleitwissen haben die Schülerinnen und Schüler nicht vom Einsatz systemischer Darstellungsformen profitiert. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen haben in der Kategorie *Lernerfolg* nicht den größten Lernzuwachs erzielt, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben. *Die Hypothese 4b muss daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ abgelehnt werden.*

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, bei denen in die Aufgaben innerhalb der Lernsitzen fertige Systemdiagramme integriert worden sind, haben in der Kategorie *Lernerfolg* ebenfalls nicht ihren größten Lernzuwachs erreicht. *Die Hypothese 4c muss daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ abgelehnt werden.*

Differenz NT – VT Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)		A ges		B ges		C ges	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
A ges	Geringes Vorwissen	-	t(27)= -0,858 n.s.	t(46)= 0,625 n.s.	t(25)= -0,376 n.s.	t(35)= 0,384 n.s.	t(31)= 0,266 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(28,129)= 1,890°	t(18)= 0,598 n.s.	t(28)= 1,095 n.s.	t(24)= 1,439 n.s.
B ges	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(23,809)= -1,279 n.s.	t(47)= -0,123 n.s.	t(36,808)= -0,399 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(26)= 0,651 n.s.	t(22)= 0,814 n.s.
C ges	Geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(32)= -0,171 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 60:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

### 12.5.3.2 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Differenziert nach dem Faktenwissen und dem Verständnis ergibt sich für die Lernzuwächse (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* bezüglich der Unterschiede zwischen den Lerngruppen (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen vs. hohes Vorwissen*) eine ganz andere Struktur (vgl. Kapitel 12.5.3.1 auf Seite 197 ff.). Während der größte Mittelwert ( $M = 0,72$ ) bei den Lernzuwächsen im Faktenwissen von Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen in der Lerngruppe *A ges* erreicht wird, tritt der größte Mittelwert ( $M = 1,18$ ) bei den Lernzuwächsen im Verständnis bei Personen mit hohem Vorwissen in der Lerngruppe *A ges* auf (siehe Tab. 61 auf Seite 201). Bezüglich des Faktenwissens erzielen Lernende mit geringem Vorwissen im Mittel die größten Lernzuwächse ( $M = 0,72$ ), wenn sie ohne Systemdiagramme gelernt haben (*A ges*). Bei Schülerinnen

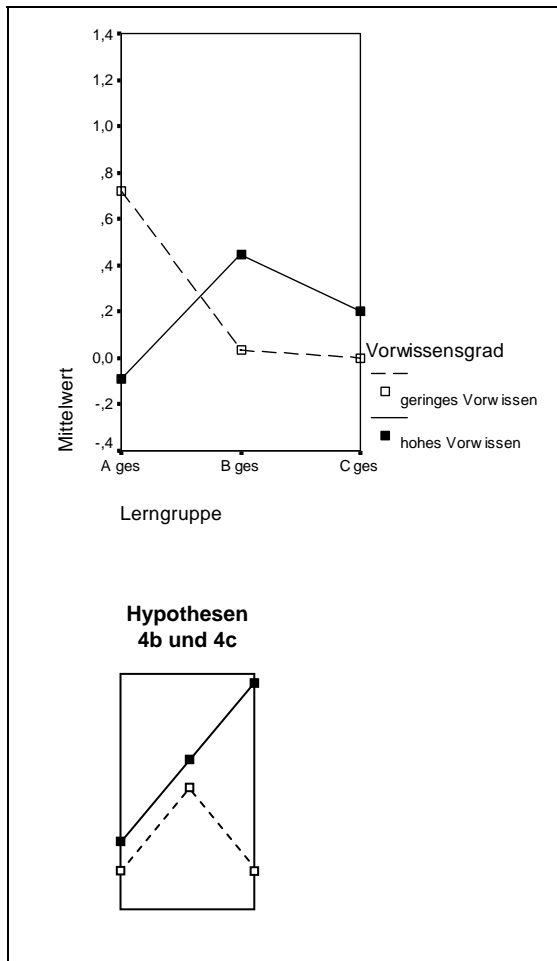


und Schülern mit hohem Vorwissen hingegen tritt der größte Mittelwert von 0,44 Punkten in der Lerngruppe auf, die mit fertigen Wirkungs- und Flussdiagrammen gelernt hat (*B ges*). Bezüglich des Verständnisses zeigt sich ein anderes Bild. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen erzielen im Mittel die größten Lernzuwächse in der Lerngruppe *A ges*, die schlechtesten in der Lerngruppe *C ges*. Die Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verzeichnen hingegen den größten Mittelwert ( $M = 1,18$ ) bei den Lernzuwächsen in Gruppe *C ges* und den kleinsten Mittelwert ( $M = 0,13$ ) in der Gruppe *A ges*.

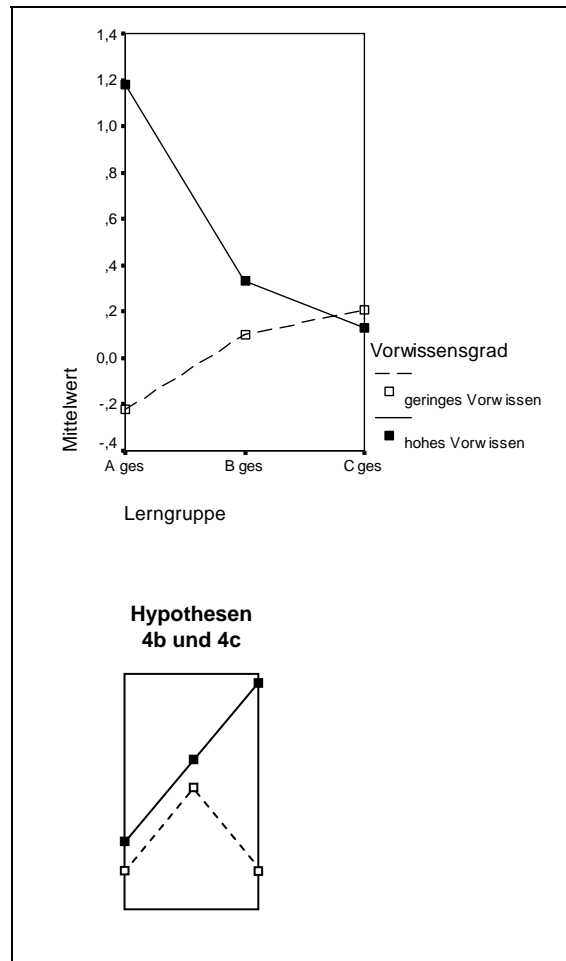
Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)</i>	<i>A ges</i>	gering	18	0,72	1,018
		hoch	11	-0,09	1,044
	<i>B ges</i>	gering	30	0,03	1,245
		hoch	9	0,44	0,527
	<i>C ges</i>	gering	19	0,00	0,943
		hoch	15	0,20	1,082
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)</i>	<i>A ges</i>	gering	18	-0,22	2,184
		hoch	11	1,18	0,751
	<i>B ges</i>	gering	30	0,10	1,539
		hoch	9	0,33	1,225
	<i>C ges</i>	gering	19	0,21	1,932
		hoch	15	0,13	1,302

**Tab. 61:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) und *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 59 und Abb. 60 auf Seite 202). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs* zeigt im Faktenwissen ( $F(1,96) = 0,088$ ; n.s.) und im Verständnis ( $F(1,96) = 2,205$ ;  $p = 0,141$ ) keinen signifikanten Haupteffekt.



**Abb. 59:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 60:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.

Das Vorwissen scheint demnach keinen Einfluss auf den Lernzuwachs in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* zu haben. Der Einfluss der Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen: *ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen* – *keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) auf den Lernzuwachs in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(2,96) = 0,326$ ; n.s. und  $F(2,96) = 0,296$ ; n.s.). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Vorwissensgrad* für das Faktenwissen ist schwach signifikant ( $F(2,96) = 2,651$ ;  $p = 0,076$ ), für das Verständnis hingegen nicht signifikant ( $F(2,96) = 1,645$ ;  $p = 0,198$ ). Die Ergebnisse der t-Tests zeigen jedoch zwischen einzelnen Gruppen signifikante Unterschiede (siehe Tab. 62 und Tab. 63 auf Seite 204). Beim Faktenwissen unterscheiden sich die Lernenden mit geringem Vorwissen, die ohne Systemdia-

gramme gelernt haben (*A ges*) schwach signifikant von denen, die mit fertigen Diagrammen gearbeitet haben (*B ges*;  $p = 0,054$ ) und signifikant von denen, die aktiv Diagramme konstruiert haben (*C ges*;  $p = 0,031$ ; siehe Tab. 62 auf Seite 203). Zudem ist der Unterschied zwischen den Versuchspersonen mit geringem und hohem Vorwissen innerhalb der Lerngruppe *A ges* signifikant ( $p = 0,048$ ). Demnach haben Lernende mit geringem Vorwissen, die ohne Diagramme gelernt haben, das Faktenwissen im Bereich des so genannten Begleitwissens stärker erworben als diejenigen mit hohem Vorwissen.

Beim Verständnis unterscheiden sich die Versuchspersonen mit geringem und hohem Vorwissen innerhalb der Lerngruppe *A ges* ebenfalls signifikant ( $p = 0,020$ ; siehe Tab. 63 auf Seite 204). Im Vergleich zum Faktenwissen schneiden jedoch die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen besser ab. Die Lernenden mit hohem Vorwissen, die ohne Diagramme gelernt haben, erzielen im Mittel den größten Lernzuwachs bei den Verständnisitems. Sie unterscheiden sich schwach signifikant von denen, die mit fertigen Diagrammen gelernt haben (*B ges*;  $p = 0,093$ ) und signifikant von denen, die aktiv Diagramme konstruiert haben (*C ges*;  $p = 0,016$ ). Die Lernenden, die nicht mit dem Methodentraining „Systemdiagramme“ beschäftigt gewesen sind, haben sich stärker mit dem Erlernen grundlegender Konzepte befasst. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen haben eher Faktenwissen, Personen mit hohem Vorwissen eher Verständnis erworben.

Differenz NT – VT Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 31)		<i>A ges</i>		<i>B ges</i>		<i>C ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>A ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(27)= 2,067*	t(46)= 1,981°	t(24,903)= 0,934 n.s.	t(35)= 2,241*	t(31)= 1,426 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(21,158)= 0,320 n.s.	t(18)= -1,395 n.s.	t(28)= -0,245 n.s.	t(24)= 0,687 n.s.
<i>B ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(32,267)= -1,431 n.s.	t(45,340)= -0,106 n.s.	t(43)= -0,441 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(26)= -1,312 n.s.	t(21,403)= -0,741 n.s.
<i>C ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(32)= -0,575 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 62:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

Differenz NT – VT Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)		A ges		B ges		C ges	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
A ges	Geringes Vorwissen	-	t(22,762)=-2,496*	t(27,221)=-0,549 n.s.	t(24,509)=-0,846 n.s.	t(35)=-0,639 n.s.	t(28,333)=-0,578 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(35,499)=-2,998**	t(12,714)=1,818°	t(25,495)=1,952°	t(22,964)=-2,587*
B ges	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(37)=-0,416 n.s.	t(47)=0,222 n.s.	t(43)=-0,072 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(26)=-0,174 n.s.	t(22)=-0,372 n.s.
C ges	Geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(32)=0,133 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 63:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (A ges, B ges und C ges) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

In Bezug auf das so genannte Begleitwissen haben die Schülerinnen und Schüler weder beim Lernen von Faktenwissen noch beim Verständniserwerb vom Einsatz systemischer Darstellungsformen profitiert. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen haben zwar in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* den größten Lernzuwachs erzielt, wenn sie mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagramme gearbeitet haben, der Unterschied zu den Lerngruppen, die ohne Diagramme gelernt bzw. eigenständig Systemdiagramme konstruiert haben, ist jedoch nicht signifikant. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen bei den Verständnisitems ebenfalls ihren größten Lernzuwachs nicht aufgrund eigenständiger Diagrammkonstruktion. *Die Hypothese 4b muss daher für den Lernzuwachs in den Kategorien „Lernerfolg – Faktenwissen“ und „Lernerfolg – Verständnis“ abgelehnt werden.*

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, bei denen in die Aufgaben der Lernsituationen fertige Systemdiagramme integriert worden sind, haben in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* ebenfalls nicht ihren größten Lernzuwachs erreicht. *Die Hypothese 4c kann daher für diese Kategorien nicht bestätigt werden.*

### 12.5.3.3 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

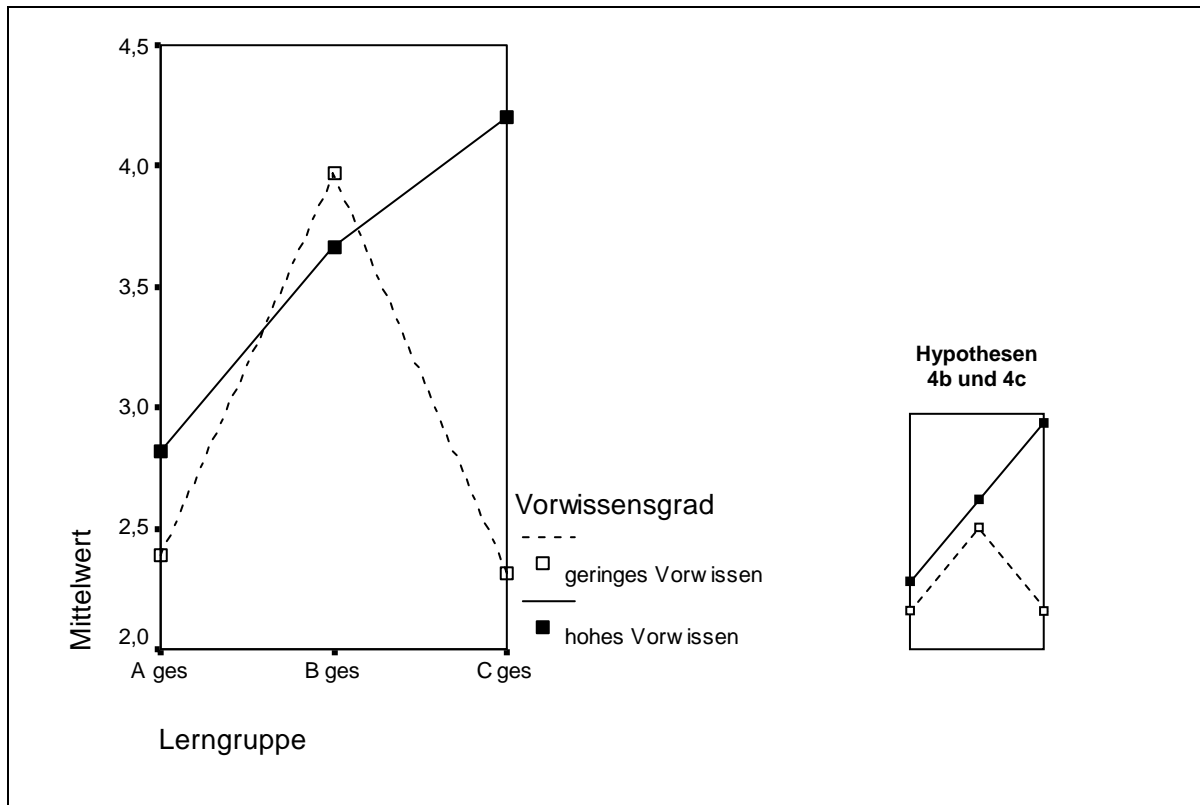
Die Summenscores in der Kategorie *System Erde* werden nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 64 auf Seite 205 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 61 auf Seite 206 dargestellt.

	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	gering	18	2,39	2,062
		hoch	11	2,82	1,537
	<i>B ges</i>	gering	30	3,97	1,790
		hoch	9	3,67	3,240
	<i>C ges</i>	gering	19	2,32	1,157
		hoch	15	4,20	2,007

**Tab. 64:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen erreichen den größten Mittelwert der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* ( $M = 3,97$ ), wenn sie mit fertigen Wirkungs- und Flussdiagrammen gelernt haben (*B ges*). Demgegenüber schneiden bei den Versuchspersonen mit hohem Vorwissen im Mittel diejenigen am besten ab ( $M = 4,20$ ), die selbständig Systemdiagramme konstruiert haben (*C ges*). Die schlechtesten Ergebnisse erzielen Lernende mit geringem Vorwissen, wenn sie die fachlichen Inhalte ohne den Einsatz von Diagrammen (*A ges*;  $M = 2,39$ ) oder mit aktiven Diagrammkonstruktionen (*C ges*;  $M = 2,32$ ) erarbeitet haben. Die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen schneiden hingegen am schlechtesten ab ( $M = 2,82$ ), wenn sie ohne Diagramme gelernt haben (*A ges*). Somit zeigen die Ergebnisse der Versuchspersonen mit hohem Vorwissen das in den Hypothesen zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen (*Hypothesen 1a*, *1b* und *1c*) postulierte Verhalten (vgl. Kapitel 12.2.3 auf Seite 174 ff.).

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* bestehen (siehe Abb. 61).



**Abb. 61:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.

Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt, dass der Einfluss des Vorwissens nur knapp das 10%-Signifikanzniveau verfehlt ( $F(1,96) = 2,685$ ;  $p = 0,105$ ). Demgegenüber ist der Einfluss der Lerngruppe (*Einsatz von Systemdiagrammen*: *ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) auf den Lernzuwachs in der Kategorien *System Erde* schwach signifikant ( $F(2,96) = 2,754$ ;  $p = 0,069$ ). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Vorwissensgrad* ist ebenfalls schwach signifikant ( $F(2,96) = 2,597$ ;  $p = 0,080$ ). Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 65 auf Seite 208 dargestellt.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen wie angenommen den größten Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*, wenn sie selbständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben. Die Integration systemischer Darstellungsformen in die Aufgaben der Lernsitungen hat dazu geführt, dass die Fachinhalte dieser Aufgaben besser gelernt wurden. Die Mittelwerte der Lerngruppen *A ges* und *B ges* ( $p = 0,486$ ) und der Lerngruppen *B ges* und *C ges* ( $p = 0,664$ ) zeigen für Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen jedoch paarweise keine signifikanten Unterschiede. Lediglich der Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Gruppen *A ges* und *C ges* ist schwach signifikant

( $p = 0,069$ ). Demnach ist das Lernen mit eigenständigen Konstruktionen von Fluss- und Wirkungsdiagrammen gegenüber dem Lernen ohne Systemdiagramme im Vorteil. Es zeigt sich auch ein tendenzieller Vorteil der aktiven Konstruktion gegenüber der passiven Rezeption. Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant. *Die Hypothese 4b kann daher nicht bestätigt werden.*<sup>48</sup>

Bei den Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen unterscheiden sich die Mittelwerte der Lerngruppen *A ges* und *B ges* ( $p = 0,008$ ) hoch und die der Lerngruppen *B ges* und *C ges* ( $p = 0,000$ ) höchst signifikant voneinander. Demnach profitieren Personen mit geringem Vorwissen stark vom Lernen mit fertigen Wirkungs- und Flussdiagrammen. Dieses hat sowohl gegenüber dem Lernen ohne Diagramme, als auch gegenüber dem Lernen mit Hilfe aktiver graphischer Konstruktionen einen großen Vorteil. *Die Hypothese 4c kann somit bestätigt werden.*<sup>49</sup>

---

<sup>48</sup> Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen unterscheiden sich die Mittelwerte der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges* und *C ges* schwach signifikant voneinander ( $p=0,069$ ). Das Lernen mit aktiven Konstruktionen ist gegenüber dem Lernen ohne Systemdiagramme im Vorteil. *Somit kann für Personen mit hohem Vorwissen die Hypothese 1b zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen bestätigt werden.*

Die Mittelwerte der Lerngruppen *A ges* und *B ges* ( $p=0,486$ ) und der Lerngruppen *B ges* und *C ges* ( $p=0,664$ ) zeigen für Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen paarweise keine signifikanten Unterschiede. Alle drei Hypothesen zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen (*Hypothese 1a, 1b* und *1c*) können jedoch in der Tendenz bestätigt werden.

<sup>49</sup> Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen lernen am besten, wenn fertige Wirkungs- und Flussdiagramme ihnen beim Strukturieren komplexer Inhalte helfen. *Die Hypothese 1c zur Wirksamkeit systemischer Darstellungsformen kann daher für Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen bestätigt werden.*

Demgegenüber erzielen Personen mit geringem Vorwissen relativ geringe Lernzuwächse, wenn sie eigenständig Systemdiagramme konstruieren. Sie sind vermutlich mit dem Erlernen der Methode „selbständiges Konstruieren von Systemdiagrammen“ innerhalb von drei Lernsitzungen überfordert. *Die Hypothese 1a kann daher für Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen nicht bestätigt werden.*

Summenscore Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44)		<i>A ges</i>		<i>B ges</i>		<i>C ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>A ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(25,759)= -0,639 n.s.	t(46)= -2,792**	t(11,348)= -1,079 n.s.	t(26,436)= 0,132 n.s.	t(31)= -2,543*
	Hohes Vorwissen	-	-	t(39)= -1,884°	t(10,922)= -0,722 n.s.	t(16,642)= 0,940 n.s.	t(24)= -1,906°
<i>B ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(9,511)= 0,266 n.s.	t(46,958)= 3,920***	t(43)= -0,396 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(8,981)= 1,215 n.s.	t(11,751)= -0,445 n.s.
<i>C ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(21,178)= -3,236**
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 65:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

#### 12.5.4 Hypothese 4d und 4e: Einfluss des Vorwissens bezüglich mehrperspektivischen Wissens

##### 12.5.4.1 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Zunächst wird der Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* untersucht. Der Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest) wird nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 66, die Mittelwertvergleiche in Abb. 62 auf Seite 209 dargestellt.

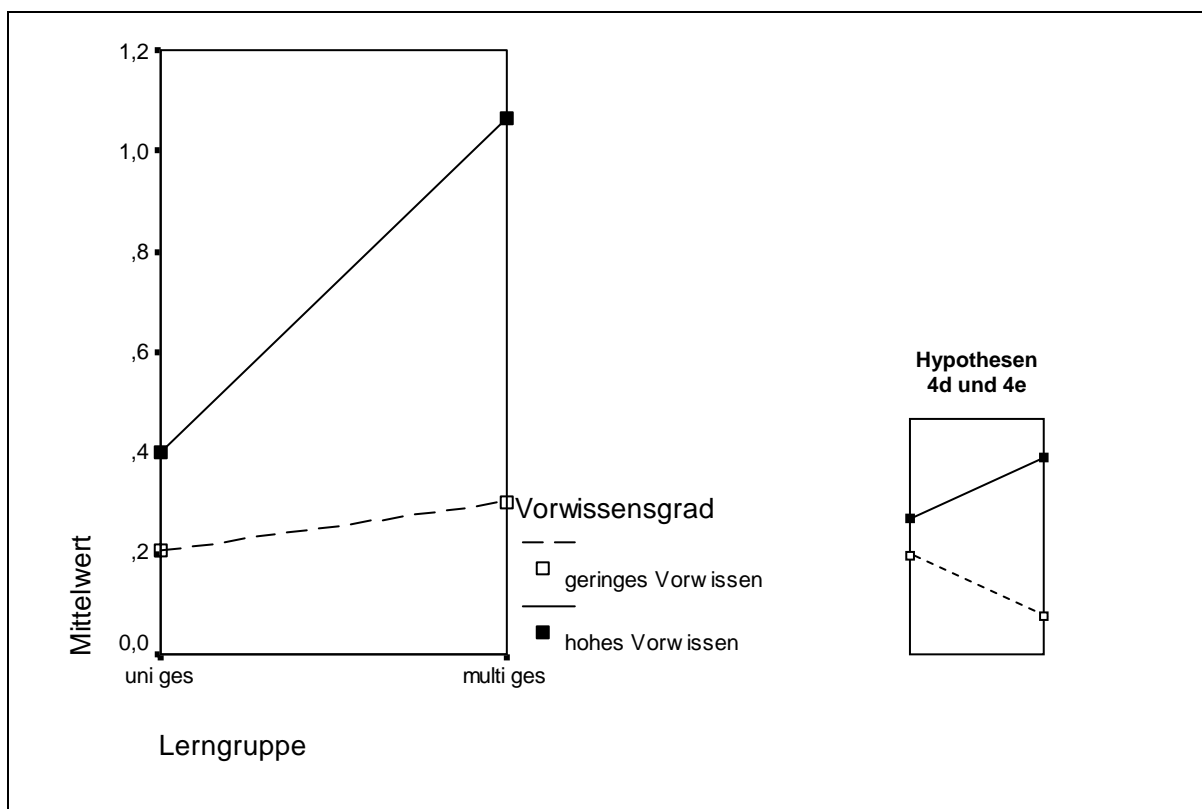
In den Lerngruppen *uni ges* und *multi ges*, die sich hinsichtlich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven unterscheiden, erreichen die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen im Mittel einen größeren Lernzuwachs als diejenigen mit geringem Vorwissen. In der Gruppe *multi ges* (zwei-perspektivisch) wird von den Versuchspersonen mit hohem Vorwissen ein Mittelwert von 1,07 Punkten, von denen mit geringem ein Mittelwert von 0,30 Punkten erzielt. Bei der Gruppe *uni ges* (uni-perspektivisch) unterscheiden sich die Mittelwerte der Lernzuwächse von Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen und von denen mit geringem Vorwissen lediglich um 0,19 Punkte.



Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>uni ges</i>	gering	34	0,21	2,397
		hoch	20	0,40	1,231
	<i>multi ges</i>	gering	33	0,30	1,776
		hoch	15	1,07	1,280

**Tab. 66:** Deskriptive Statistiken des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (univariaten Varianzanalyse) wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* bestehen (siehe Abb. 62 auf Seite 209).



**Abb. 62:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.

Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe (Anzahl inhaltlicher Perspektiven)* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(1,98) = 1,489$ ;  $p = 0,225$ ). Das Vorwissen hat demnach keinen Einfluss auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*. Der Lerngruppeneffekt (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(1,98) = 0,947$ ; n.s.). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe (Anzahl inhaltlicher Perspektiven)* und *Vorwissensgrad* ist auch nicht signifikant ( $F(1,98) = 0,527$ ; n.s.). Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 67 auf Seite 210 aufgeführt.

Differenz NT – VT <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)</i>		<i>uni ges</i>		<i>multi ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>uni ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(51,313)= -0,392 n.s.	t(65)= -0,188 n.s.	t(45,066)= -1,632 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(49,964)= 0,234 n.s.	t(33)= -1,559 n.s.
<i>multi ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(46)= -1,494 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 67:** Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erzielen wie angenommen größere Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg*, wenn sie zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen. Begleitwissen wird daher eher erworben, wenn mehrperspektivisch gelernt wird. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant ( $p = 0,129$ ). *Die Hypothese 4d kann daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ nicht bestätigt werden.*

Die Mittelwerte der Lernzuwächse von Versuchspersonen mit geringem Vorwissen zeigen fast keinen Unterschied. Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Material gelernt haben erzielen nur einen um 0,09 Punkte größeren Wert. *Die Hypothese 4e muss daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „Lernerfolg“ abgelehnt werden.*

### 12.5.4.1.1 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Der Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest) wird unterteilt in den Lernzuwachs beim Faktenwissen und den beim Verständnis. Diese Lernzuwächse werden nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 68 auf Seite 211, die Mittelwertvergleiche in Abb. 63 und Abb. 64 auf Seite 212 dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>uni ges</i>	gering	34	0,09	1,111
		hoch	20	0,20	1,056
	<i>multi ges</i>	gering	33	0,33	1,164
		hoch	15	0,13	0,834
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>uni ges</i>	gering	34	0,12	2,114
		hoch	20	0,20	1,196
	<i>multi ges</i>	gering	33	-0,03	1,489
		hoch	15	0,93	1,100

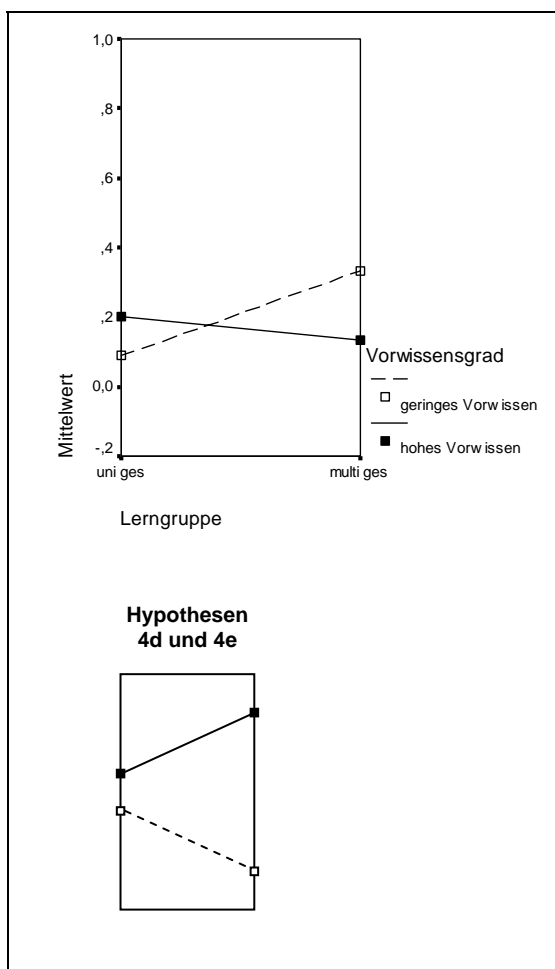
**Tab. 68:** Deskriptive Statistiken des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) und *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl der inhaltlichen Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Während der größte Mittelwert ( $M = 0,33$ ) bei den Lernzuwächsen im Faktenwissen von Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen in der Lerngruppe *multi ges* erreicht wird, tritt der größte Mittelwert ( $M = 0,93$ ) bei den Lernzuwächsen im Verständnis bei Personen mit hohem Vorwissen in der Lerngruppe *multi ges* auf. Bezüglich des Faktenwissens erzielen Lernende mit geringem Vorwissen im Mittel einen größeren Lernzuwachs ( $M = 0,33$ ), wenn sie zwei-perspektivisch gelernt haben (*multi ges*).

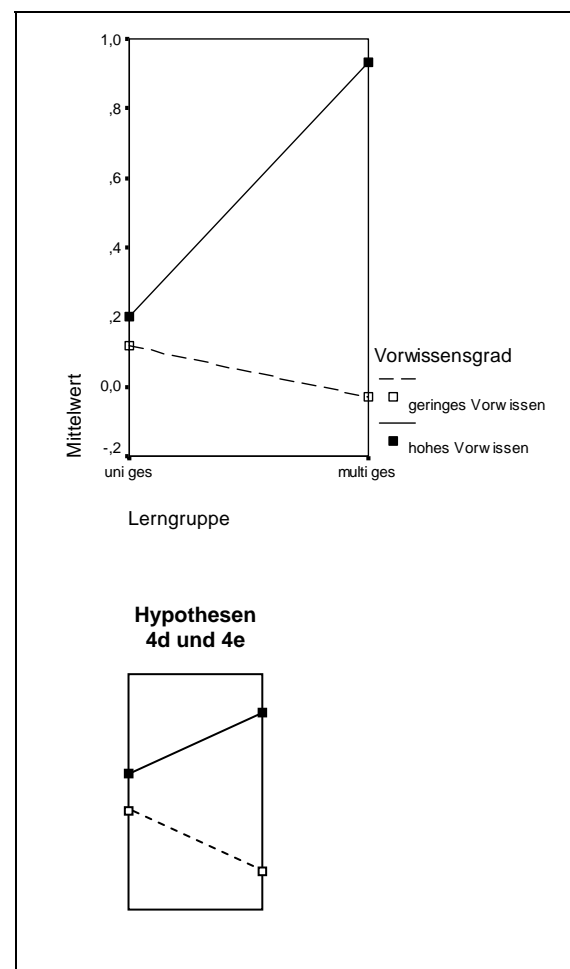
Bei Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen hingegen tritt der größere Mittelwert von 0,20 Punkten in der Lerngruppe auf, die uni-perspektivisch gelernt hat (*uni ges*). Bezüglich des Verständnisses zeigt sich ein ganz anderes Bild. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen erzielen im Mittel den größeren Lernzuwachs in der Lerngruppe *multi ges* ( $M = 0,93$ ). Die Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verzeichnen hingegen den größeren Mittelwert ( $M = 0,12$ ) bei den Lernzuwächsen in der Gruppe *uni ges*. Alle

Werte unterscheiden sich jedoch relativ gering voneinander. Es können lediglich tendenzielle Unterschiede beschrieben werden.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen im Faktenwissen und Verständnis bestehen (siehe Abb. 63 und Abb. 64). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (Anzahl inhaltlicher Perspektiven) und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* zeigt keine signifikanten Effekte (Vorwissenseinfluss:  $F(1,98) = 0,038$ ; n.s.; Lerngruppeneinfluss:  $F(1,98) = 0,154$ ; n.s.; Interaktionseffekt:  $F(1,98) = 0,470$ ; n.s.).



**Abb. 63:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 64:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.

Auch für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* können keine signifikanten Effekte ermittelt werden (Vorwissenseinfluss:  $F(1,98) = 2,315$ ;  $p=0,131$ ; Lerngruppeneinfluss:  $F(1,98) = 0,725$ ; n.s.; Interaktionseffekt:  $F(1,98) = 1,643$ ; n.s.). Jedoch unterscheiden sich bei der Beantwortung der Verständnisitems einzelne Gruppen signifikant voneinander. Die Ergebnisse der Einzelgruppenvergleiche (t-Tests) sind in Tab. 69 und Tab. 70 aufgeführt.

Differenz NT – VT <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)</i>		<i>uni ges</i>		<i>multi ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>uni ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(52)=-0,363 n.s.	t(65)=-0,882 n.s.	t(35,327)=-0,157 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(43,316)=-0,428 n.s.	t(33)=0,202 n.s.
<i>multi ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(37,056)=0,677 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-

n.s.  $p>0,1$ ; °  $p\leq 0,1$ ; \*  $p\leq 0,05$ ; \*\*  $p\leq 0,01$ ; \*\*\*  $p\leq 0,001$

**Tab. 69:** Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

Differenz NT – VT <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 19 – 22)</i>		<i>uni ges</i>		<i>multi ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>uni ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(51,963)=-0,183 n.s.	t(65)=0,330 n.s.	t(45,527)=-1,771°
	Hohes Vorwissen	-	-	t(51)=0,586 n.s.	t(33)=-1,857°
<i>multi ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(46)=-2,239*
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-

n.s.  $p>0,1$ ; °  $p\leq 0,1$ ; \*  $p\leq 0,05$ ; \*\*  $p\leq 0,01$ ; \*\*\*  $p\leq 0,001$

**Tab. 70:** Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

In Bezug auf das Faktenwissen gibt es zwischen den Gruppen *uni ges* und *multi ges* sowohl bei den Schülerinnen und Schülern mit geringem, als auch bei denen mit hohem Vorwissen fast keine Mittelwertsunterschiede. *Daher müssen die Hypothesen 4d und 4e für die Kategorie „Lernerfolg – Faktenwissen“ abgelehnt werden.*

Versuchspersonen mit geringem Vorwissen erzielen – wie schon beim Faktenwissen – auch in der Kategorie *Verständnis* relativ geringe Mittelwertsunterschiede zwischen den Gruppen *uni ges* und *multi ges*. *In Bezug auf das Verständnis kann die Hypothese 4e somit ebenfalls nicht bestätigt werden.*

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erzielen in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* jedoch wie angenommen größere Lernzuwächse, wenn sie zweiperspektivisches Material nutzen. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen, die zweiperspektivisch gelernt haben (*multi ges*), unterscheiden sich von der Lerngruppe *uni ges – hohes Vorwissen* schwach signifikant ( $t(33) = -1,857$ ;  $p = 0,072$ ). *Somit kann die Hypothese 4d für die Kategorie „Lernerfolg – Verständnis“ bestätigt werden.*

Zudem unterscheiden sich Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zweiperspektivisch gelernt haben (*multi ges*), von der Lerngruppe *uni ges – geringes Vorwissen* schwach signifikant ( $t(45,527) = -1,771$ ;  $p = 0,083$ ) sowie von der Lerngruppe *multi ges – geringes Vorwissen* signifikant ( $t(46) = -2,239$ ;  $p = 0,030$ ).

#### 12.5.4.2 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

Die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* werden nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zweiperspektivisch*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 71 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 65 auf Seite 216 dargestellt.

	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>uni ges</i>	gering	34	2,97	1,784
		hoch	20	4,10	2,532
	<i>multi ges</i>	gering	33	3,18	1,991
		hoch	15	3,00	1,773

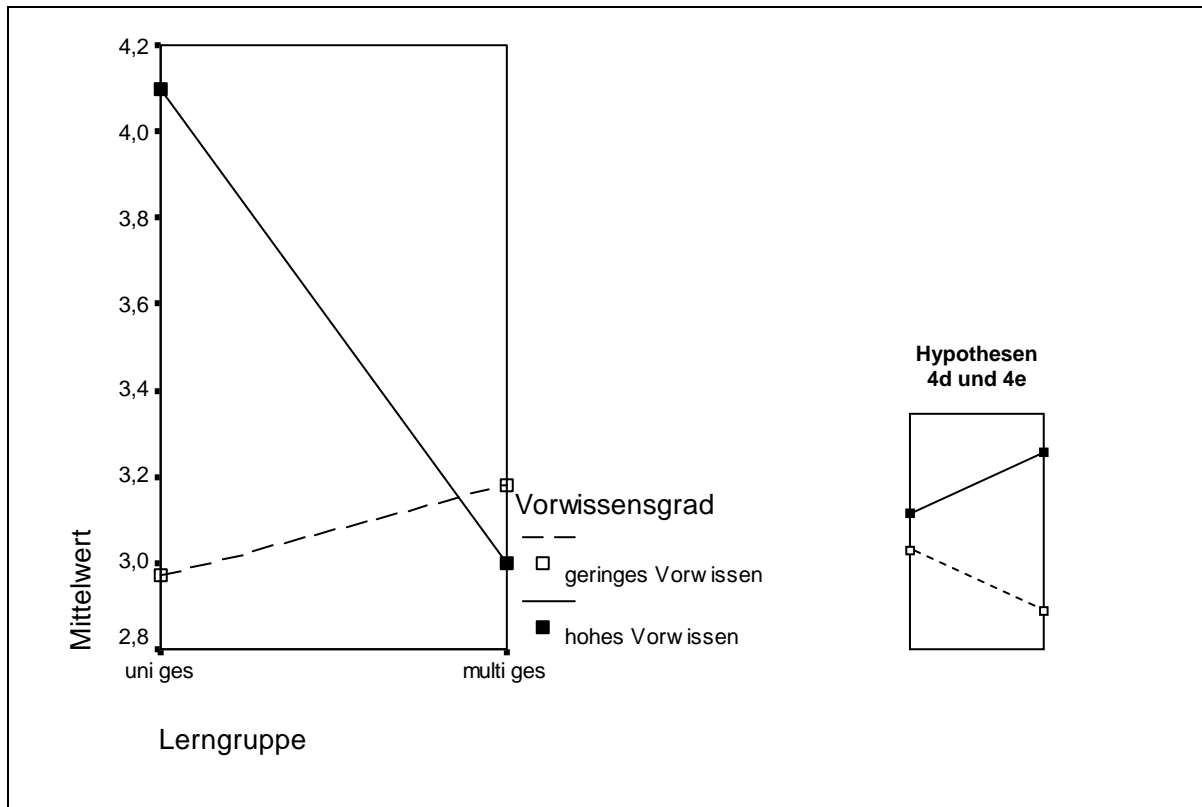
**Tab. 71:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen erreichen in den Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* mit 2,97 und 3,18 Punkten annähernd gleiche Mittelwerte. Demgegenüber schneiden bei den Versuchspersonen mit hohem Vorwissen im Mittel diejenigen am besten ab ( $M = 4,10$ ), die uni-perspektivisches Lernmaterial präsentiert bekommen haben (*uni ges*). Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zwei-perspektivisches Material erhalten haben (*multi ges*), erreichen im Mittel nur 3,00 Punkte.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* bestehen. Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe (Anzahl inhaltlicher Perspektiven)* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(1,98) = 1,255$ ;  $p = 0,265$ ). Das Vorwissen hat demnach keinen Einfluss auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*. Der Lernumgebungseffekt (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(1,98) = 1,104$ ;  $p = 0,296$ ). Der Interaktionseffekt verfehlt nur knapp das 10%-Signifikanzniveau ( $F(1,98) = 2,402$ ;  $p = 0,124$ ). Es unterscheiden sich lediglich innerhalb der Lerngruppe *uni ges* die Versuchspersonen mit geringem Vorwissen von denen mit hohem Vorwissen schwach signifikant ( $t(52) = -1,919$ ;  $p = 0,060$ ). Die Ergebnisse der Einzelgruppenvergleiche mit Hilfe von t-Tests sind in Tab. 72 auf Seite 216 dargestellt.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen entgegen der Annahme die größten Lernzuwächse, wenn sie mit ein-perspektivischem Material (*uni ges*) gelernt haben. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. *Die Hypothese 4d kann für den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ nicht bestätigt werden.*

Versuchspersonen mit geringem Vorwissen erzielen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *System Erde* fast keinen Unterschied zwischen den Gruppen *uni ges* und *multi ges*. *Hypothese 4e kann daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ nicht bestätigt werden.*



**Abb. 65:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.

Summenscore Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44)		<i>uni ges</i>		<i>multi ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>uni ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(52)= -1,919°	t(65)= -0,458 n.s.	t(47)= -0,053 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	t(51)= 1,467 n.s.	t(33)= 1,437 n.s.
<i>multi ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(46)= 0,303 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 72:** Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).



## 12.5.5 Hypothesen 4f und 4g: Einfluss des Vorwissens bezüglich der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens

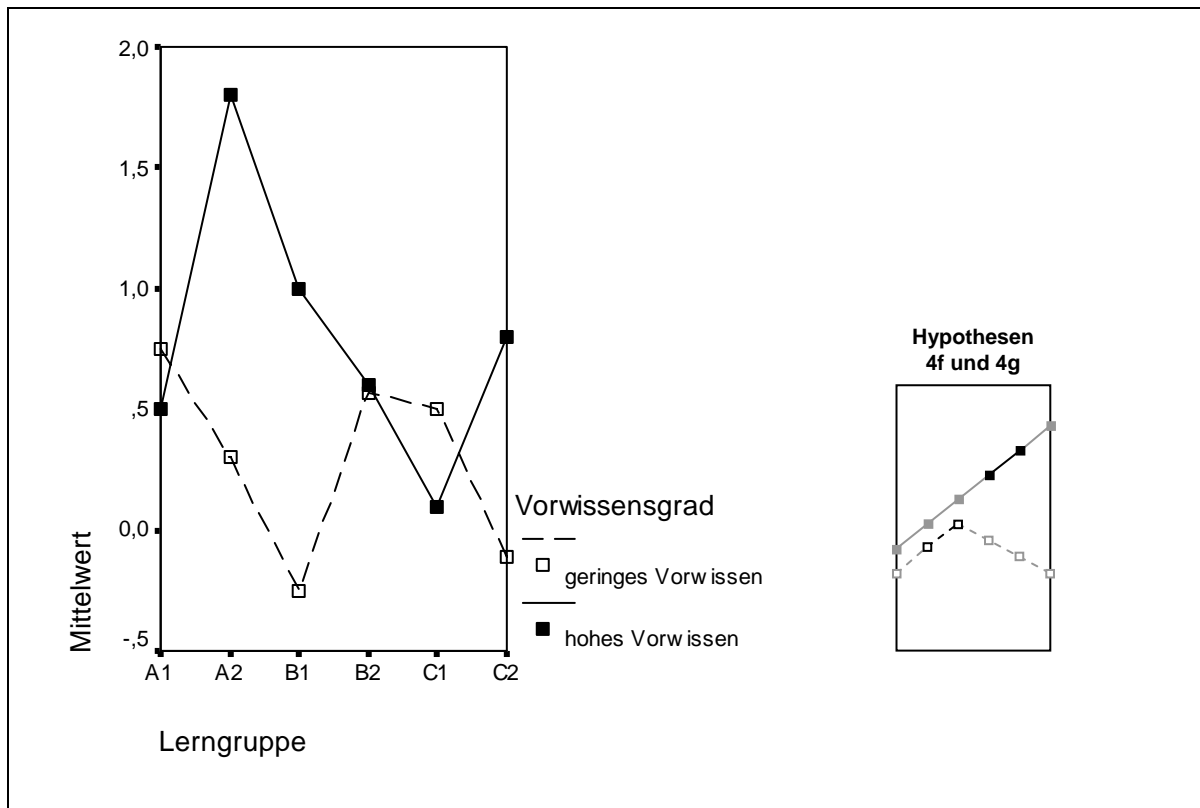
### 12.5.5.1 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) werden nach allen sechs Lerngruppen differenziert (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 73 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 66 auf Seite 218 dargestellt. Wie schon in Kapitel 12.4.1 beschrieben, sind die Lernzuwächse (Kategorie *Lernerfolg*) relativ gering (siehe Tab. 73). Die Mittelwerte reichen von -0,25 Punkten bei der Lerngruppe *B 1* – *geringes Vorwissen* bis zu 1,80 Punkten bei der Lerngruppe *A 2* – *hohes Vorwissen*. Die Standardabweichung ist vor allem bei der Lerngruppe *C 1* – *geringes Vorwissen* relativ hoch ( $SD = 3,240$ ). Mit Ausnahme der Lerngruppen *A 1* und *C 1* erreichen die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen im Mittel bessere Ergebnisse als die mit geringem Vorwissen.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i>	gering	8	0,75	2,550
		hoch	6	0,50	0,837
	<i>A 2</i>	gering	10	0,30	1,703
		hoch	5	1,80	1,304
	<i>B 1</i>	gering	16	-0,25	1,693
		hoch	4	1,00	1,155
	<i>B 2</i>	gering	14	0,57	2,102
		hoch	5	0,60	1,140
	<i>C 1</i>	gering	10	0,50	3,240
		hoch	10	0,10	1,449
	<i>C 2</i>	gering	9	-0,11	1,364
		hoch	5	0,80	1,304

**Tab. 73:** Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 66). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt keine signifikanten Haupteffekte (Vorwissenseinfluss:  $F(1,90) = 1,509$ ;  $p = 0,222$ ; Lerngruppeneinfluss:  $F(5,90) = 0,308$ ; n.s.; Interaktionseffekt:  $F(5,90) = 0,680$ ; n.s.). Die t-Tests sind in Tab. 74 und Tab. 75 auf Seite 219 aufgeführt.



**Abb. 66:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen profitieren beim Lernen des Begleitwissens entgegen der Annahme nicht von der aktiven Systemdiagrammkonstruktion. Im Mittel erreichen sie die größten Lernzuwächse, wenn sie der Gruppe A 2 (zwei-perspektivisch und ohne Systemdiagramme), die kleinsten, wenn sie der Gruppe C 1 (uni-perspektivisch und aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen) angehören. Dieser Mittelwertsunterschied ist signifikant ( $t(13) = 2,207$ ;  $p = 0,046$ ). Alle weiteren Einzelvergleiche ergeben nur sehr geringe Unterschiede und sind nicht oder nur schwach signifikant. *Die Hypothese 4f kann daher für die Kategorie „Lernerfolg“ nicht bestätigt werden.*

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i> geringes Vorwissen	<i>A 2</i> geringes Vorwissen	<i>B 1</i> geringes Vorwissen	<i>B 2</i> geringes Vorwissen	<i>C 1</i> geringes Vorwissen	<i>C 2</i> geringes Vorwissen
<i>A 1</i> geringes Vorwissen	-	t(16)= 0,448 n.s.	t(22)= 1,151 n.s.	t(20)= 0,178 n.s.	t(16)= 0,178 n.s.	t(15)= 0,883 n.s.
<i>A 2</i> geringes Vorwissen	-	-	t(24)= 0,804 n.s.	t(22)= -0,336 n.s.	t(18)= -0,173 n.s.	t(17)= 0,576 n.s.
<i>B 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	t(28)= -1,185 n.s.	t(24)= -0,777 n.s.	t(23)= -0,210 n.s.
<i>B 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	t(22)= 0,066 n.s.	t(21)= 0,861 n.s.
<i>C 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(17)= 0,524 n.s.
<i>C 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 74:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test).

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i> hohes Vorwissen	<i>A 2</i> hohes Vorwissen	<i>B 1</i> hohes Vorwissen	<i>B 2</i> hohes Vorwissen	<i>C 1</i> hohes Vorwissen	<i>C 2</i> hohes Vorwissen
<i>A 1</i> hohes Vorwissen	-	t(9)= -2,007 °	t(5,093)= -0,745 n.s.	t(9)= -0,168 n.s.	t(14)= 0,612 n.s.	t(9)= -0,463 n.s.
<i>A 2</i> hohes Vorwissen	-	-	t(7)= 0,960 n.s.	t(8)= 1,549 n.s.	t(13)= 2,207 *	t(8)= 1,213 n.s.
<i>B 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	t(7)= 0,520 n.s.	t(12)= 1,101 n.s.	t(7)= 0,240 n.s.
<i>B 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(13)= 0,670 n.s.	t(8)= -0,258 n.s.
<i>C 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(13)= -1,909 n.s.
<i>C 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 75:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test).

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen lernen entgegen der Annahme besser mit zwei-perspektivischem Material und ohne Systemdiagramme (A 2) als mit uni-perspektivischem Material und fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen (B 1). Die Einzelvergleiche der Mittelwerte sind jedoch nicht signifikant. Die Hypothese 4g kann für die Kategorie „Lernerfolg“ nicht bestätigt werden.

### 12.5.5.2 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) werden in Lernzuwächse bezüglich des Faktenwissens und des Verständnisses unterteilt und nach allen sechs Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 76 dieser Seite und Tab. 77 auf Seite 221 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 67 und Abb. 68 auf Seite 222 dargestellt.

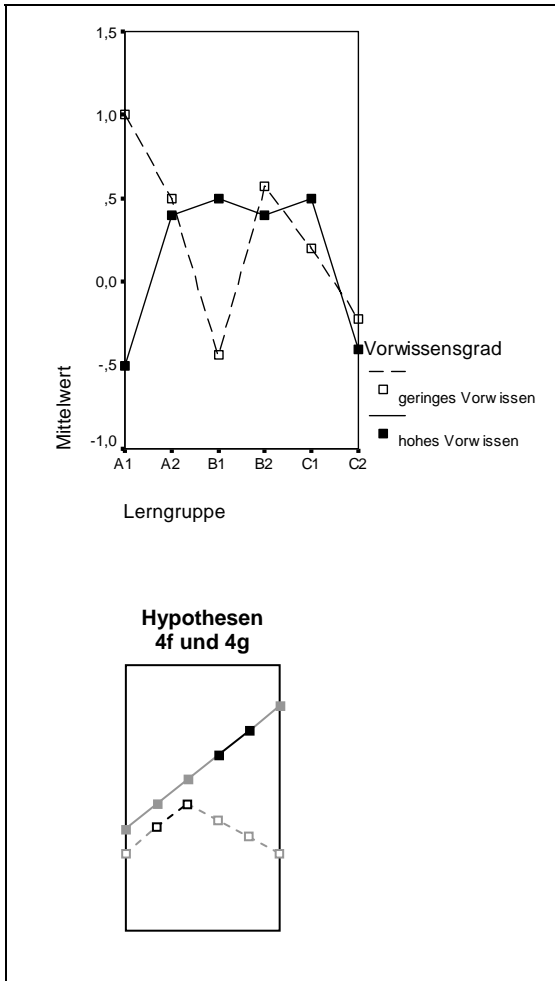
Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)</i>	A 1	gering	8	1,00	0,756
		hoch	6	-0,50	0,837
	A 2	gering	10	0,50	1,179
		hoch	5	0,40	1,140
	B 1	gering	16	-0,44	1,094
		hoch	4	0,50	0,577
	B 2	gering	14	0,57	1,222
		hoch	5	0,40	0,548
	C 1	gering	10	0,20	0,919
		hoch	10	0,50	1,179
	C 2	gering	9	-0,22	0,972
		hoch	5	-0,40	0,548

**Tab. 76:** Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) differenziert nach Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) und nach dem Vorwissensgrad.

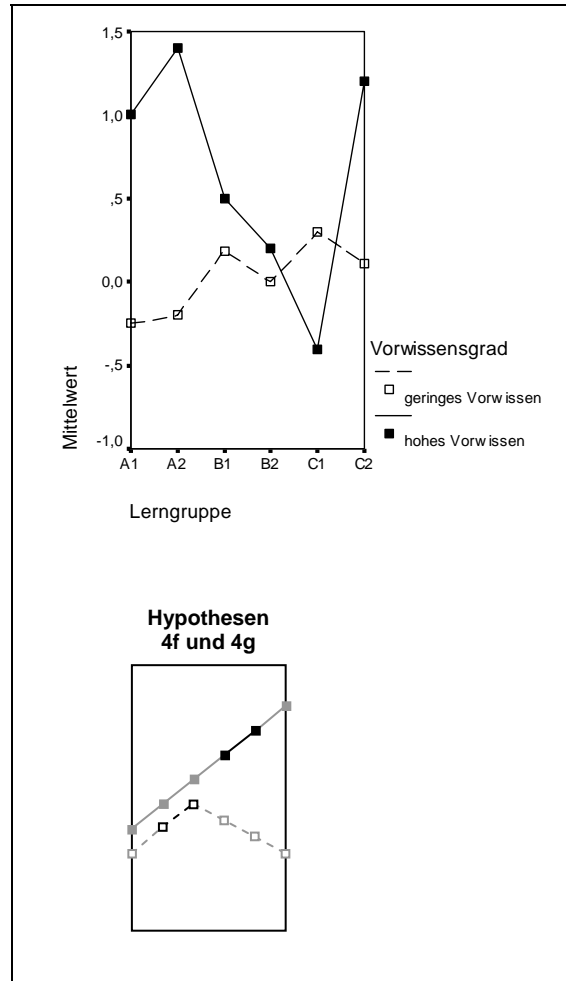
Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)</i>	A 1	gering	8	-0,25	2,659
		hoch	6	1,00	0,894
	A 2	gering	10	-0,20	1,874
		hoch	5	1,40	0,548
	B 1	gering	16	0,19	1,601
		hoch	4	0,50	1,291
	B 2	gering	14	0,00	1,519
		hoch	5	0,20	1,304
	C 1	gering	10	0,30	2,541
		hoch	10	-0,40	1,075
	C 2	gering	9	0,11	1,054
		hoch	5	1,20	1,095

**Tab. 77:** Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen im Faktenwissen (siehe Abb. 67) und im Verständnis (siehe Abb. 68) bestehen. Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs – Faktenwissen* zeigt keinen signifikanten Vorwissenseffekt ( $F(1,90) = 0,289$ ; n.s.) und keinen signifikanten Lernumgebungseffekt ( $F(5,90) = 1,187$ ; n.s.). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* ist schwach signifikant ( $F(5,90) = 2,115$ ;  $p = 0,071$ ). Für die abhängige Variable *Lernzuwachs – Verständnis* ist der Vorwissenseffekt schwach signifikant ( $F(1,90) = 3,019$ ;  $p = 0,086$ ), der Lernumgebungseffekt ( $F(5,90) = 0,432$ ; n.s.) und der Interaktionseffekt der beiden Faktoren ( $F(5,90) = 1,065$ ; n.s.) hingegen nicht. Die Einzelvergleiche mit Hilfe von t-Tests sind in Tab. 78 auf Seite 223 und Tab. 79 auf Seite 224 aufgeführt.



**Abb. 67:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 68:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt.

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg Fakten- wissen (Item 19 – 31)</i>	<i>A 1</i> geringes Vorwissen	<i>A 2</i> geringes Vorwissen	<i>B 1</i> geringes Vorwissen	<i>B 2</i> geringes Vorwissen	<i>C 1</i> geringes Vorwissen	<i>C 2</i> geringes Vorwissen
<i>A 1</i> geringes Vorwissen	-	t(15,400)= 1,090 n.s.	t(19,401)= 3,760 **.	t(19,775)= 1,015 n.s.	t(16)= 1,981 °	t(14,774)= 2,910 *.
<i>A 2</i> geringes Vorwissen	-	-	t(24)= 2,065 °	t(22)= -0,143 n.s.	t(18)= 0,653 n.s.	t(17)= 1,447 n.s.
<i>B 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	t(28)= -2,387 *	t(24)= -1,533 n.s.	t(23)= -0,491 n.s.
<i>B 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	t(22)= 0,809 n.s.	t(21)= 1,639 n.s.
<i>C 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(17)= 0,973 n.s.
<i>C 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s. p>0,1; ° p≤0,1; \* p≤0,05; \*\* p≤0,01; \*\*\* p≤0,001

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg Fakten- wissen (Item 19 – 31)</i>	<i>A 1</i> hohes Vorwissen	<i>A 2</i> hohes Vorwissen	<i>B 1</i> hohes Vorwissen	<i>B 2</i> hohes Vorwissen	<i>C 1</i> hohes Vorwissen	<i>C 2</i> hohes Vorwissen
<i>A 1</i> hohes Vorwissen	-	t(9)= -1,512 n.s.	t(8)= -2,066 °	t(9)= -2,057 °	t(14)= -1,811 °	t(9)= -0,229 n.s.
<i>A 2</i> hohes Vorwissen	-	-	t(7)= -0,158 n.s.	t(5,753)= 0,000 n.s.	t(13)= -0,156 n.s.	t(5,753)= 1,414 n.s.
<i>B 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	t(7)= 0,266 n.s.	t(11,077)= 0,000 n.s.	t(7)= 2,393 *
<i>B 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(12,998)= -0,224 n.s.	t(8)= 2,309 °
<i>C 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(12,998)= 2,018 °
<i>C 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s. p>0,1; ° p≤0,1; \* p≤0,05; \*\* p≤0,01; \*\*\* p≤0,001

**Tab. 78:** Unterschiede zwischen den Lerngruppen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22; t-Test).

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg Verständnis</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i> geringes Vorwissen	<i>A 2</i> geringes Vorwissen	<i>B 1</i> geringes Vorwissen	<i>B 2</i> geringes Vorwissen	<i>C 1</i> geringes Vorwissen	<i>C 2</i> geringes Vorwissen
<i>A 1</i> geringes Vorwissen	-	t(16)= -0,047 n.s.	t(22)= -0,505 n.s.	t(9,673)= -0,244 n.s.	t(16)= -0,447 n.s.	t(8,939)= -0,360 n.s.
<i>A 2</i> geringes Vorwissen	-	-	t(24)= -0,563 n.s.	t(16,861)= -0,278 n.s.	t(18)= -0,501 n.s.	t(14,434)= -0,452 n.s.
<i>B 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	t(28)= 0,328 n.s.	t(24)= -0,139 n.s.	t(23)= 0,128 n.s.
<i>B 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	t(22)= -0,362 n.s.	t(21)= -0,191 n.s.
<i>C 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(12,267)= 0,215 n.s.
<i>C 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/ Lernerfolg Verständnis</i> (Item 19 – 31)	<i>A 1</i> hohes Vorwissen	<i>A 2</i> hohes Vorwissen	<i>B 1</i> hohes Vorwissen	<i>B 2</i> hohes Vorwissen	<i>C 1</i> hohes Vorwissen	<i>C 2</i> hohes Vorwissen
<i>A 1</i> hohes Vorwissen	-	t(9)= -0,869 n.s.	t(8)= 0,730 n.s.	t(9)= 1,206 n.s.	t(14)= 2,673 *	t(9)= -0,334 n.s.
<i>A 2</i> hohes Vorwissen	-	-	t(3,866)= 1,304 n.s.	t(5,369)= 1,897 n.s.	t(12,930)= 4,296 **	t(8)= 0,365 n.s.
<i>B 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	t(7)= 0,344 n.s.	t(12)= 1,343 n.s.	t(7)= -0,882 n.s.
<i>B 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(13)= 0,952 n.s.	t(8)= -1,313 n.s.
<i>C 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(13)= -2,702 *
<i>C 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 79:** Unterschiede zwischen den Lerngruppen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31; t-Test).



Die größten Lernzuwächse erzielen Versuchspersonen mit hohem Vorwissen bei den Verständnisitems. Vor allem die Lerngruppen A 2 (zwei-perspektivisch und ohne Diagramme) und C 2 (zwei-perspektivisch und mit aktiver Diagrammkonstruktion) sind durch große Mittelwerte gekennzeichnet. Diese unterscheiden sich von dem kleinsten Mittelwert (C 1 – uni-perspektivisch und mit aktiver Fluss- und Wirkungsdiagrammkonstruktion) hoch signifikant ( $t(12,930) = 4,296$ ;  $p = 0,001$ ) bzw. signifikant ( $t(13) = -2,702$ ;  $p = 0,018$ ). Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen treten zwischen den Gruppen B 2 (zwei-perspektivisch und mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen) und C 1 (uni-perspektivisch und mit aktiver Systemdiagrammkonstruktion) nur sehr geringe Mittelwertsunterschiede der Lernzuwächse bezüglich des Faktenwissens und des Verständnisses auf. Die Unterschiede sind nicht signifikant. *Die Hypothese 4f kann daher für die Kategorie „Lernerfolg – Faktenwissen“ als auch für die Kategorie „Lernerfolg – Verständnis“ nicht bestätigt werden.*

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen lernen Faktenwissen entgegen der Annahme mit zwei-perspektivischem Material ohne Systemdiagramme (A 2) besser als mit uni-perspektivischem Material und fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen (B 1). Die Unterschiede sind schwach signifikant ( $t(24) = 2,065$ ;  $p = 0,050$ ). *Die Hypothese 4g kann daher für die Kategorie „Lernerfolg – Faktenwissen“ nicht bestätigt werden.*

Die Mittelwertsunterschiede der Verständnisszuwächse von Versuchspersonen mit geringem Vorwissen sind relativ gering und nicht signifikant. *Die Hypothese 4g muss daher auch für die Kategorie „Lernerfolg – Verständnis“ abgelehnt werden.*

### **12.5.5.3 Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie System Erde**

Die Summenscores der Lernzuwächse in der Kategorie *System Erde* werden nach allen sechs Lerngruppen (A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2) und nach dem Vorwissensgrad (geringes Vorwissen vs. hohes Vorwissen) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 80 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 69 auf Seite 227 dargestellt.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die der Lerngruppe B 1 angehören (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption; uni-perspektivisch), erreichen im Mittel die meisten Punkte ( $M = 5,25$ ). Der kleinste Mittelwert ( $M = 2,00$ ) tritt bei Versuchspersonen der Lerngruppe A 1 auf, die sich durch geringes Vorwissen auszeichnen.

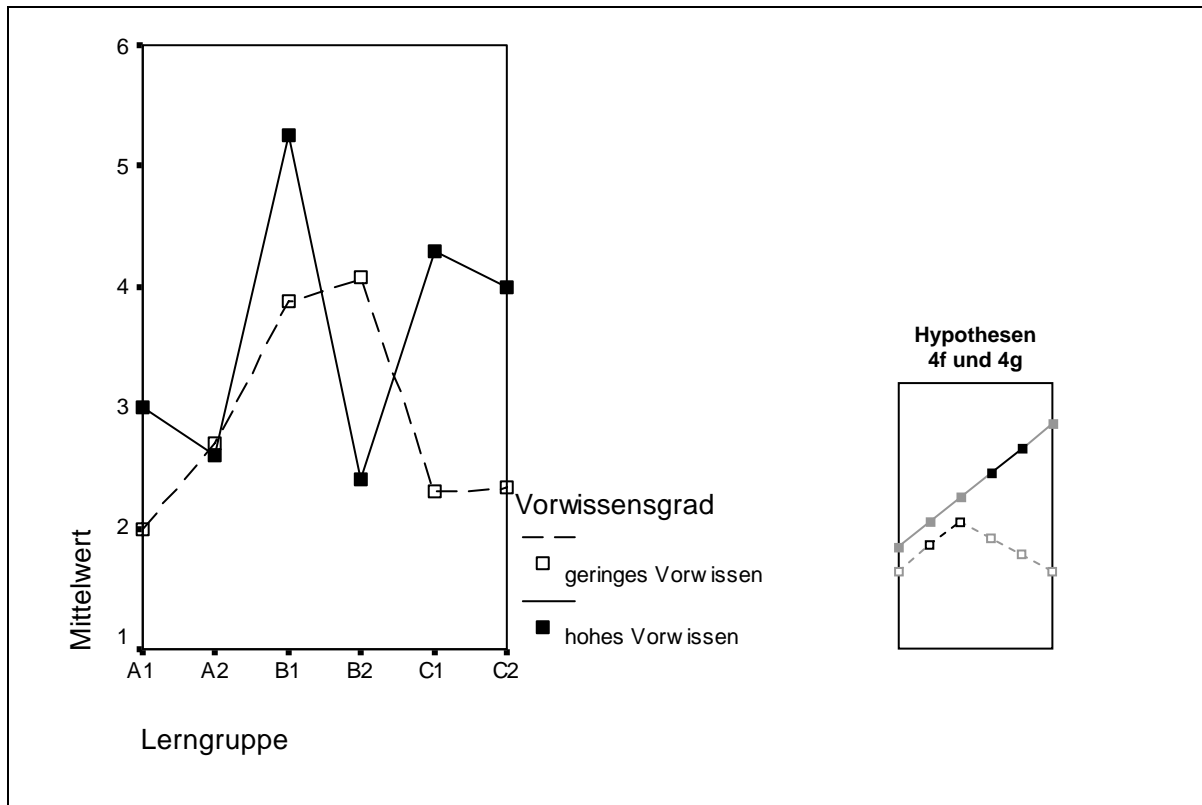
Die Mittelwertvergleiche bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen und die Mittelwertvergleiche bei denjenigen mit hohem Vorwissen unterscheiden sich deutlich voneinander. Während beim geringen Vorwissen zwischen den Gruppen A 1 und A 2, B 1

und *B 2* sowie *C 1* und *C 2* jeweils relativ kleine Abweichungen zu verzeichnen sind, fällt beim hohen Vorwissen der Mittelwert der Gruppe *B 1* deutlich größer aus ( $M = 5,25$ ) als der Mittelwert der Gruppe *B 2* ( $M = 2,40$ ).

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
Summenscore <i>System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A 1</i>	gering	8	2,00	1,852
		hoch	6	3,00	1,265
	<i>A 2</i>	gering	10	2,70	2,263
		hoch	5	2,60	1,949
	<i>B 1</i>	gering	16	3,87	1,628
		hoch	4	5,25	4,031
	<i>B 2</i>	gering	14	4,07	2,018
		hoch	5	2,40	2,074
	<i>C 1</i>	gering	10	2,30	1,337
		hoch	10	4,30	2,406
	<i>C 2</i>	gering	9	2,33	1,000
		hoch	5	4,00	1,000

**Tab. 80:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) bezüglich der erreichten Mittelwerte des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* bestehen. Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigte einen schwach signifikanten Haupteffekt ( $F(1,90) = 2,930$ ;  $p = 0,090$ ). Das Vorwissen hat demnach einen Einfluss auf das Lernen in der Kategorie *System Erde*. Der Lernumgebungseffekt verfehlt nur knapp das 10%-Signifikanzniveau ( $F(5,90) = 1,879$ ;  $p = 0,106$ ). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* ist schwach signifikant ( $F(5,90) = 1,950$ ;  $p = 0,094$ ). Die Einzelvergleiche mit Hilfe von *t*-Tests sind in Tab. 81 auf Seite 228 und Tab. 82 auf Seite 228 aufgeführt.



**Abb. 69:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt.

Bei Lernenden mit hohem Vorwissen ist die eigenständige Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen wie angenommen von Vorteil. Die Mittelwerte der Gruppen B 2 (zwei-perspektivisch und mit fertigen Systemdiagrammen) und C 1 (uni-perspektivisch und mit aktiver Diagrammkonstruktion) unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander. *Die Hypothese 4f muss daher für die Kategorie „System Erde“ abgelehnt werden.*

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44)</i>	<i>A 1</i> hohes Vorwissen	<i>A 2</i> hohes Vorwissen	<i>B 1</i> hohes Vorwissen	<i>B 2</i> hohes Vorwissen	<i>C 1</i> hohes Vorwissen	<i>C 2</i> hohes Vorwissen
<i>A 1</i> hohes Vorwissen	-	t(6,645)= 0,395 n.s.	t(3,398)= -1,081 n.s.	t(6,375)= 0,565 n.s.	t(14)= -1,215 n.s.	t(9)= -1,430 n.s.
<i>A 2</i> hohes Vorwissen	-	-	t(4,119)= -1,207 n.s.	t(8)= 0,157 n.s.	t(13)= -1,364 n.s.	t(5,969)= -1,429 n.s.
<i>B 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	t(4,261)= 1,285 n.s.	t(3,890)= 0,441 n.s.	t(3,297)= 0,605 n.s.
<i>B 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(13)= -1,502 n.s.	t(5,765)= -1,554 n.s.
<i>C 1</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(13)= 0,264 n.s.
<i>C 2</i> hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 81:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test).

<b>Differenz NT – VT</b> <i>Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44)</i>	<i>A 1</i> geringes Vorwissen	<i>A 2</i> geringes Vorwissen	<i>B 1</i> geringes Vorwissen	<i>B 2</i> geringes Vorwissen	<i>C 1</i> geringes Vorwissen	<i>C 2</i> geringes Vorwissen
<i>A 1</i> geringes Vorwissen	-	t(16)= -0,705 n.s.	t(22)= -2,544 *	t(20)= -2,383 *	t(16)= -0,400 n.s.	t(10,484)= -0,454 n.s.
<i>A 2</i> geringes Vorwissen	-	-	t(14,831)= -1,427 n.s.	t(22)= -1,561 n.s.	t(14,603)= 0,481 n.s.	t(12,658)= 0,464 n.s.
<i>B 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	t(28)= -0,295 n.s.	t(24)= 2,561 *	t(22,712)= 2,931 **
<i>B 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	t(21,928)= 2,585 *	t(20,070)= 2,742 *
<i>C 1</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(17)= -0,061 n.s.
<i>C 2</i> geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 82:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test).

### 12.5.6 Zusammenfassung

In Kapitel 12.5 ist der Einfluss des Vorwissens untersucht worden. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen wie angenommen einen größeren mittleren Lernzuwachs als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen. Dies trifft sowohl für die Kategorie *Lernerfolg* als auch für die Kategorie *System Erde* zu. Die Mittelwertsunterschiede sind jedoch in beiden Kategorien relativ gering und nicht signifikant.

Bezüglich des Einflusses systemischer Darstellungsformen (*mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) ist gezeigt worden, dass Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren. Zudem hat die Untersuchung ergeben, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen stärker vom Einsatz fertiger Fluss- und Wirkungsdiagramme profitieren als von der eigenständigen Konstruktion solcher Diagramme. Dies gilt für das Lernen in der Kategorie *System Erde*, nicht jedoch für das Lernen in der Kategorie *Lernerfolg*, die das grundlegende chemisch-physikalische und systemtheoretische Wissen umfasst.

Bezogen auf den Einfluss mehrperspektivischen Wissens (*uni-perspektivisch* vs. *zweiperspektivisch*) können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lerngruppen ermittelt werden. Dies trifft sowohl für Schülerinnen und Schülern mit geringem als auch für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen zu. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Kategorien *Lernerfolg* und *System Erde*.

Im Zusammenhang mit der Kombination des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und der Verwendung mehrperspektivischen Lernmaterials hat sich gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf tendenziell stärker verbessern als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zweiperspektivisches Lernmaterial nutzen. Dies gilt für das Lernen in der Kategorie *System Erde*, nicht jedoch bezüglich des Lernens in der Kategorie *Lernerfolg*. Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial genutzt haben, haben ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf tendenziell stärker verbessert als Schülerinnen und Schüler, die mit zweiperspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme gearbeitet haben. Dieses Ergebnis zeigt sich ebenfalls für die Kategorie *System Erde*, nicht jedoch für die Kategorie *Lernerfolg*.

## 12.6 Einfluss der Lernpräferenz

In dieser Arbeit sollte auch der Einfluss der Lernpräferenz (*Verbalisierer* vs. *Visualisierer*) untersucht werden. Der Einsatz systemischer Darstellungsformen beeinflusst vor allem den Wissenserwerb von Visualisierern positiv. Es wurden folgende Hypothesen angenommen (siehe Kapitel 9.5 auf Seite 92):

*Hypothese 5a*      *Visualisierer profitieren stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen als Verbalisierer.*

*Hypothese 5b*      *Verbalisierer lernen ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut wie mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen.*

### 12.6.1 Clusteranalyse zur Einteilung der Versuchspersonen in Gruppen mit unterschiedlichem Vorwissensgrad

Um die 102 Versuchspersonen in die Gruppen *Visualisierer* und *Verbalisierer* einzuteilen, die sich signifikant in ihrer Lernpräferenz unterscheiden, werden die Mittelwerte der Skalen *visuelle Lernpräferenz* und *verbale Lernpräferenz* im Vortest einer Clusteranalyse unterzogen. Fünf Versuchspersonen können aufgrund fehlender Werte nicht berücksichtigt werden. Die beiden resultierenden Gruppen unterscheiden sich in Bezug auf die Mittelwerte ihrer verbalen und visuellen Lernpräferenz maximal. Die deskriptiven Statistiken für die Cluster *Visualisierer* und *Verbalisierer* sind in Tab. 83 und Tab. 84 aufgeführt.

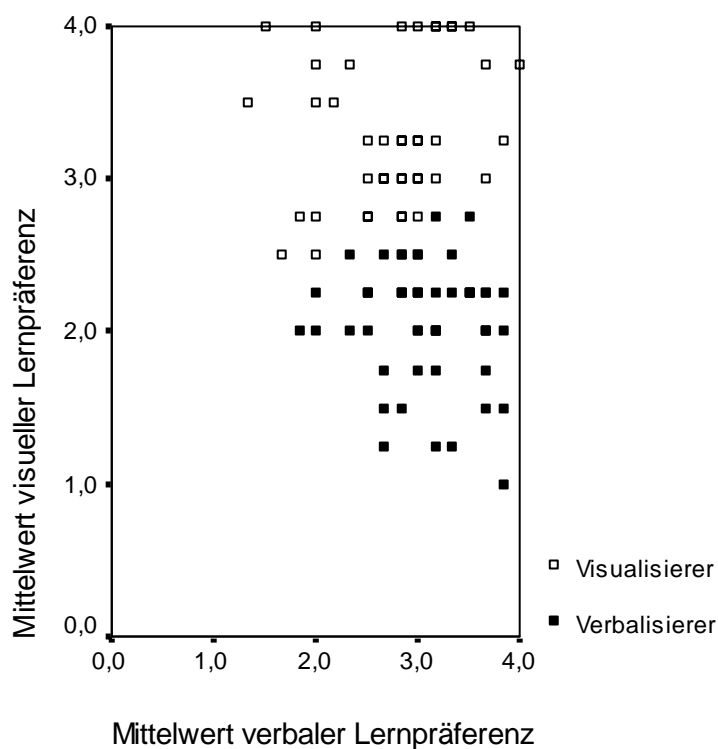
<i>Visualisierer</i>	N	M	SD	Min	Max
Mittelwert <i>visueller Lernpräferenz</i> (4 Items)	43	3,297	0,4795	2,5	4,0
Mittelwert <i>verbaler Lernpräferenz</i> (6 Items)	54	2,065	0,3830	1,0	2,8

**Tab. 83:** Deskriptive Statistik für die Gruppe *Visualisierer*.

<i>Verbalisierer</i>	N	M	SD	Min	Max
Mittelwert <i>visueller Lernpräferenz</i> (4 Items)	43	2,729	0,6162	1,3	4,0
Mittelwert <i>verbaler Lernpräferenz</i> (6 Items)	54	3,074	0,5002	1,8	3,8

**Tab. 84:** Deskriptive Statistik für die Gruppe *Verbalisierer*.

Die Zuordnung zu den beiden Clustern erfolgte größtenteils nach der dominierenden Lernpräferenz. Verbalisierer erzielen mehrheitlich größere Mittelwerte bei den Items zur verbalen Lernpräferenz. Visualisierer erreichen mehrheitlich größere Mittelwerte bei den visuellen Lernpräferenzitems. Ein Streudiagramm verdeutlicht die Clusterzugehörigkeit der Schülerinnen und Schüler (siehe Abb. 70). Auf der Abszisse sind die Mittelwerte der verbalen Lernpräferenz, auf der Ordinate die der visuellen Lernpräferenz angegeben. Das Diagramm zeigt, dass einige Versuchspersonen aus der Gruppe der Visualisierer sowohl mit visuellen als auch mit verbalen Kompetenzen ausgestattet sind. Verbalisierer zeigen hingegen eher verbale Lernpräferenzen.



**Abb. 70:** Streudiagramm für die beiden Gruppen *Visualisierer* und *Verbalisierer*.

## 12.6.2 Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg*

Der Einfluss der Lernpräferenz wird an dieser Stelle in Bezug auf den Einsatz systemischer Darstellungsformen untersucht. Der Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest) wird nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach der Lernpräferenz (*Verbalisierer* vs. *Visualisierer*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab.85, die Mittelwertvergleiche in Abb. 71 auf Seite 233 dargestellt.

Verbalisierer erzielen den größten Mittelwert ( $M = 0,83$ ) bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg*, wenn keine Systemdiagramme in die Lernaufgaben integriert sind (*A ges*). Sie erreichen den kleinsten Mittelwert ( $M = 0,50$ ), wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben (*C ges*).

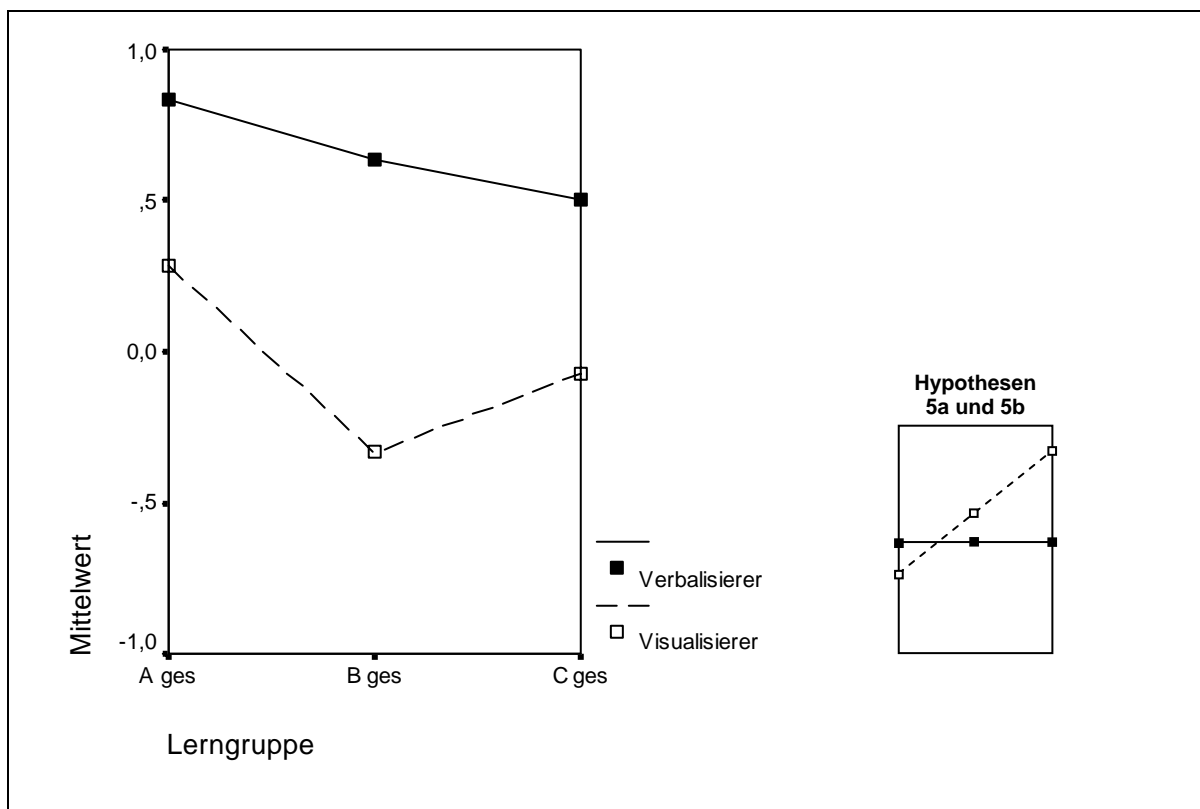
Visualisierer haben im Mittel geringere Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg*. Sie erzielen den größten Mittelwert ( $M = 0,29$ ), wenn keine Systemdiagramme genutzt werden können. In den Lerngruppen *B ges* (passive Rezeption von Fluss- und Wirkungsdiagrammen) und *C ges* (aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen) treten sogar negative Lernzuwächse auf. In Bezug auf die Lernerfolgitems sind im Vortest demnach mehr Punkte erreicht worden als im Nachtest.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,83	0,937
		Visualisierer	14	0,29	2,268
	<i>B ges</i>	Verbalisierer	22	0,64	1,529
		Visualisierer	15	-0,33	2,059
	<i>C ges</i>	Verbalisierer	20	0,50	2,328
		Visualisierer	14	-0,07	1,592

**Tab.85:** Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach der Lernpräferenz.



Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 71). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Lernpräferenz* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* zeigt einen schwach signifikanten Haupteffekt ( $F(1,91) = 3,186$ ;  $p = 0,078$ ). Verbalisierer erzielen höhere Lernzuwächse als Visualisierer. Im Hinblick auf die drei unterschiedlichen Lernumgebungen *A ges*, *B ges* und *C ges* fallen die Mittelwertunterschiede der Lernzuwächse nicht signifikant aus ( $F(2,91) = 0,390$ ; n.s.). Es deutet sich ein Interaktionseffekt an. Schülerinnen und Schüler, die dem Cluster *Verbalisierer* zugeordnet werden, erzielen im Mittel den geringsten Lernzuwachs beim aktiven Konstruieren von Systemdiagrammen. Visualisierer hingegen profitieren von der eigenständigen Diagrammkonstruktion. Dieser Interaktionseffekt ist jedoch nicht signifikant ( $F(2,91) = 0,132$ ; n.s.). Die Einzelvergleiche der Mittelwerte ergeben innerhalb der Gruppe der Verbalisierer als auch innerhalb der Gruppe der Visualisierer ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 86 auf Seite 234 aufgeführt.



**Abb. 71:** Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt.

Visualisierer profitieren entgegen der Annahme nicht vom Lernen mit Systemdiagrammen. Sie zeigen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* relativ geringe Mittelwertsunterschiede. *Die Hypothese 5a muss daher für die Kategorie „Lernzuwachs/Lernerfolg“ abgelehnt werden.*

Differenz NT – VT Lernzuwachs/ Lernerfolg gesamt (Item 19 – 31)		<i>A ges</i>		<i>B ges</i>		<i>C ges</i>	
		Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer
<i>A ges</i>	Verbalisiere	-	t(17,861)= 0,825 n.s.	t(31,425)= 0,465 n.s.	t(20,449)= 1,956°	t(27,221)= 0,568 n.s.	t(24)= 1,726°
	Visualisierer	-	-	t(34)= -0,555 n.s.	t(27)= 0,771 n.s.	t(32)= -0,267 n.s.	t(26)= 0,482 n.s.
<i>B ges</i>	Verbalisiere	-	-	-	t(35)= 1,645 n.s.	t(40)= 0,226 n.s.	t(34)= 1,333 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	t(33)= -1,100 n.s.	t(27)= -0,381 n.s.
<i>C ges</i>	Verbalisiere	-	-	-	-	-	t(32)= 0,796 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	-	-

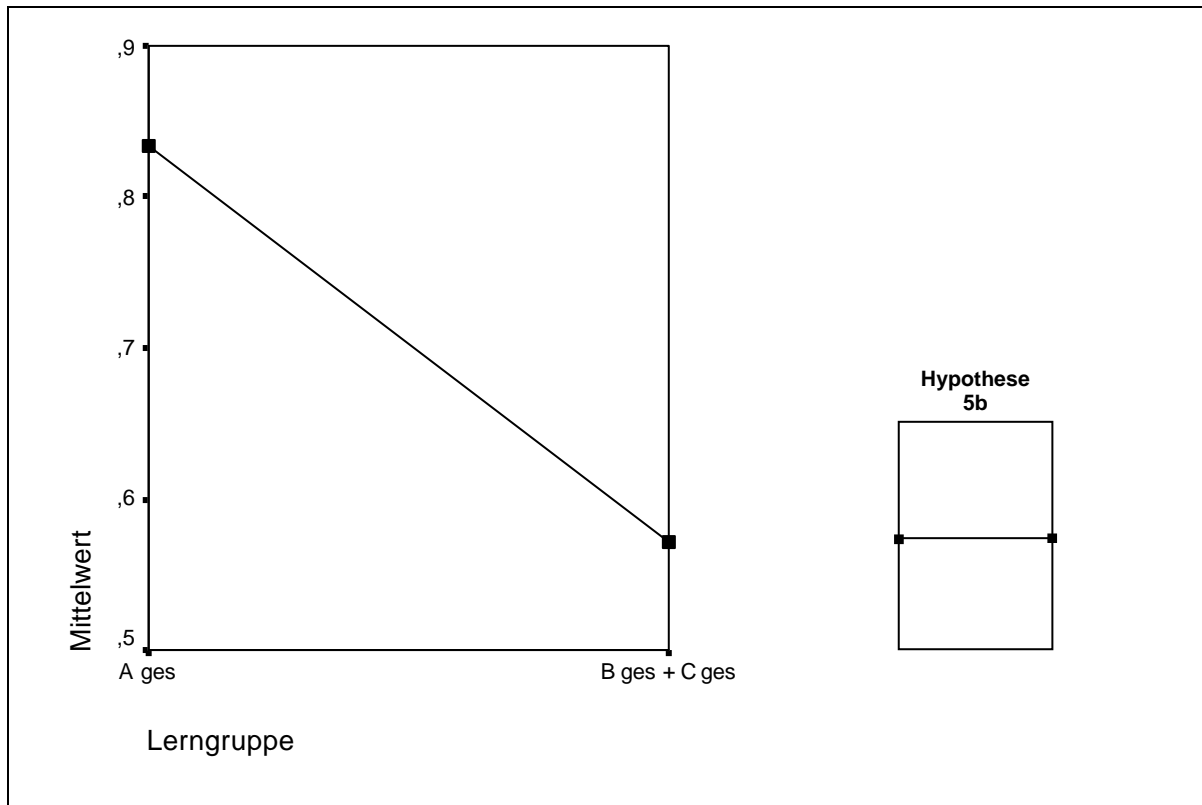
n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p < 0,1$ ; \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$

**Tab. 86:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test).

Versuchspersonen, die der Gruppe der Verbalisierer zugeordnet werden, zeigen noch geringere Mittelwertsunterschiede zwischen den Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges*. Die Lernumgebung scheint keinen Einfluss auf den Lernzuwachs zu haben. Die Lerngruppen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Innerhalb der Gruppe der Verbalisierer unterscheidet sich der Mittelwert der Lernenden, die Fluss- und Wirkungsdiagramme genutzt haben (*B ges* + *C ges*;  $M = 0,57$ ), nur sehr gering von dem Mittelwert der Personen, die ohne Diagramme gelernt haben (*A ges*;  $M = 0,83$ ; siehe Tab. 87 und Abb. 72). Der Unterschied ist wie erwartet nicht signifikant ( $t(38,533) = 0,651$ ;  $p_\alpha = 0,519$ ; siehe Tab. 88). Die  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit ist größer als 20% ( $p_\alpha > 0,2$ ). Die Hypothese 5b kann in Bezug auf den  $p_\alpha$ -Wert beibehalten werden. Um die gemäß der Nullhypothese formulierte Annahme für die Kategorie *Lernerfolg* überprüfen zu können, muss zusätzlich die  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit berechnet werden (Effektstärkeindex  $d = 0,1484$ ). Der  $p_\beta$ -Wert ist größer als 5% ( $p_\beta = 0,8844$ ). Die Power beträgt 0,1156 (Critical  $t(52) = 1,6747$ ; Delta = 0,4534). Die Hypothese 5b ist somit zu verwerfen. Die Ergebnisse liegen in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 5b kann weder bestätigt noch abgelehnt werden.*

	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,83	0,937
	<i>B ges + C ges</i>	Verbalisierer	42	0,57	1,927

**Tab. 87:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) von Verbalisierern differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges* – ohne Diagramme, *B ges + C ges* – mit Diagrammen).



**Abb. 72:** Mittelwertvergleich der beiden Lerngruppen *A ges* und *B ges + C ges* in der Kategorie *Lernerfolg* (Item 19 – 31) von Verbalisierern. Rechts ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 5b vermutet worden ist, dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31)	<i>A ges</i>	t(38,533)=0,651 n.s.
	<i>B ges + C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 88:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen von Verbalisierern in der Kategorie *Lernerfolg* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges* – ohne Diagramme, *B ges + C ges* – mit Diagrammen; t-Test).

### 12.6.3 Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* differenziert nach Faktenwissen und Verständnis

Der Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* wird differenziert nach Faktenwissen und Verständnis untersucht. Der Lernzuwachs in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* (Differenz der Summenscores aus Nachtest und Vortest) wird nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach der Lernpräferenz (*Verbalisierer* vs. *Visualisierer*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 89, die Mittelwertvergleiche in Abb. 73 und Abb. 74 auf Seite 237 dargestellt.

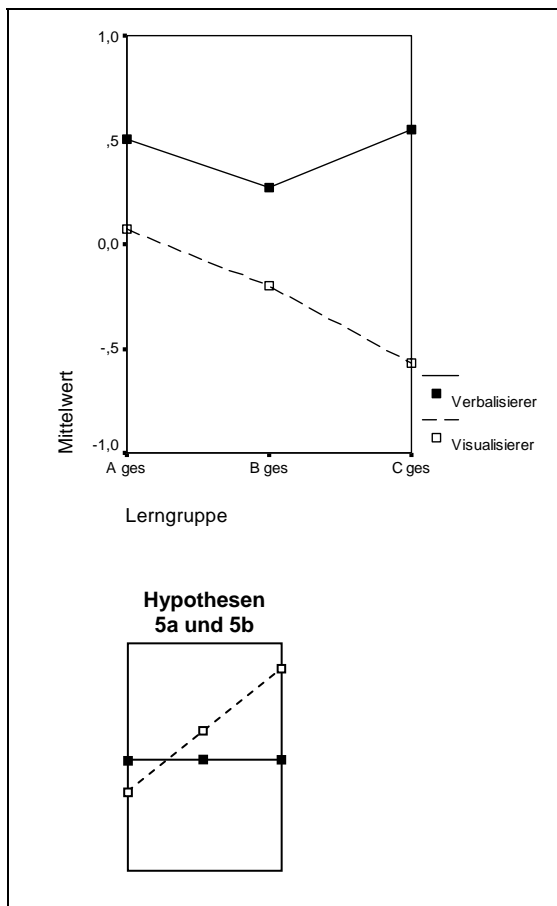
Differenz NT – VT	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,50	1,243
		Visualisierer	14	0,07	0,829
	<i>B ges</i>	Verbalisierer	22	0,27	0,985
		Visualisierer	15	-0,20	1,265
	<i>C ges</i>	Verbalisierer	20	0,55	0,945
		Visualisierer	14	-0,57	0,646
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,33	1,435
		Visualisierer	14	0,21	2,359
	<i>B ges</i>	Verbalisierer	22	0,36	1,497
		Visualisierer	15	-0,13	1,457
	<i>C ges</i>	Verbalisierer	20	-0,05	1,820
		Visualisierer	14	0,50	1,401

**Tab. 89:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) und *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach der Lernpräferenz.

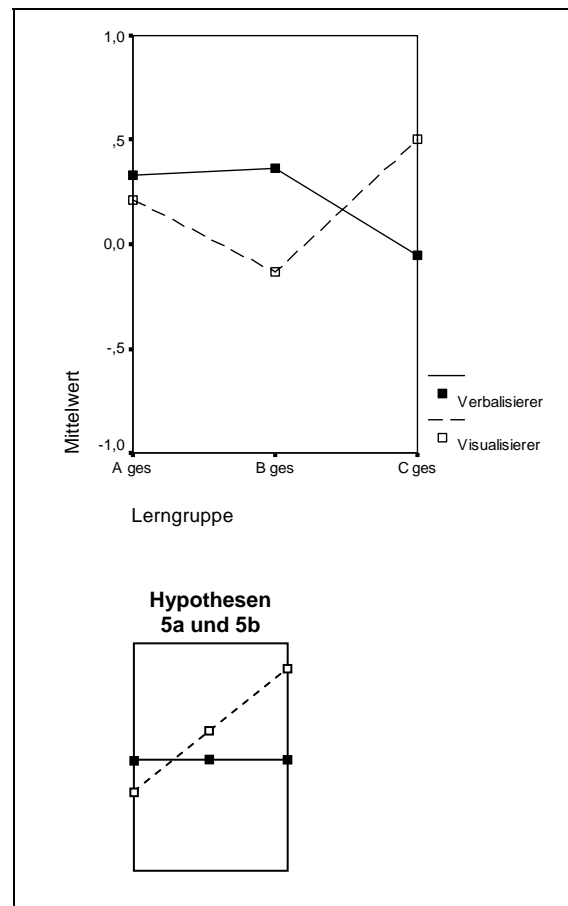
In der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen* erzielen die Verbalisierer im Mittel stets die größeren Lernzuwächse. Demgegenüber erreichen Visualisierer der Gruppe *C ges* (aktive Konstruktion von Systemdiagrammen) bei den Verständnisitems einen größeren Lernzuwachsmittelwert ( $M = 0,50$ ) als die Verbalisierer ( $M = -0,05$ ). Die Mittelwertsunterschiede sind allgemein jedoch relativ gering. Schülerinnen und Schüler, die dem Cluster *Visuali-*

sierer zugeordnet werden, erzielen bei den Faktenwissenitems sogar negative Lernzuwächse ( $M = -0,20$  bzw.  $M = -0,57$ ), wenn Systemdiagramme eingesetzt werden (*B ges* bzw. *C ges*). Bei den Verständnisitems erreichen Visualisierer in der Lerngruppe *B ges*, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme genutzt hat, im Mittel einen negativen Lernzuwachs ( $M = -0,13$ ).

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 73 und Abb. 74). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Lernpräferenz* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* zeigt einen hoch signifikanten Haupteffekt ( $F(1,91) = 10,528$ ;  $p = 0,002$ ).



**Abb. 73:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt.



**Abb. 74:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt.

Verbalisierer erzielen höhere Lernzuwächse beim Faktenwissen als Visualisierer. Im Hinblick auf die drei Lerngruppen fallen die Mittelwertsunterschiede nicht signifikant aus ((F(2,91) = 0,713; n.s.). Die Wechselwirkung zwischen den Faktoren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Lernpräferenz* ist ebenfalls nicht signifikant (F(1,91) = 1,197; n.s.). Die Einzelvergleiche der Mittelwerte ergeben innerhalb der Gruppen mit hohem und geringem Vorwissen keine signifikanten Unterschiede. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 90 aufgeführt.

Differenz NT – VT <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 31)</i>		<i>A ges</i>		<i>B ges</i>		<i>C ges</i>	
		Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer
<i>A ges</i>	Verbalisiere	-	t(18,683)= 1,016 n.s.	t(32)= 0,586 n.s.	t(25)= 1,440 n.s.	t(30)= -0,129 n.s.	t(15,961)= 2,690*
	Visualisierer	-	-	t(31,242)= -0,660 n.s.	t(24,303)= 0,688 n.s.	t(30,267)= -1,564 n.s.	t(26)= 2,289*
<i>B ges</i>	Verbalisiere	-	-	-	t(35)= 1,277 n.s.	t(40)= -0,929 n.s.	t(33,935)= 3,105**
	Visualisierer	-	-	-	-	t(33)= -2,011°	t(21,144)= 1,005 n.s.
<i>C ges</i>	Verbalisiere	-	-	-	-	-	t(31,996)= 4,110**
	Visualisierer	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 90:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test).

In Bezug auf den Lernzuwachs beim Verständnis unterscheiden sich Verbalisierer und Visualisierer relativ gering. Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Lernpräferenz* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt (F(1,91) = 0,004; n.s.). Auch im Hinblick auf die drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* fallen die Mittelwertsunterschiede nicht signifikant aus ((F(2,91) = 0,073; n.s.). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Lernpräferenz* ist ebenfalls nicht signifikant (F(2,91) = 0,833; n.s.). Die Einzelvergleiche der Mittelwerte ergeben innerhalb der Gruppe mit hohem Vorwissen und der mit geringem Vorwissen keine signifikanten Unterschiede. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 91 auf Seite 239 aufgeführt.

Differenz NT – VT Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)		A ges		B ges		C ges	
		Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer
A ges	Verbalisierer	-	t(24)= 0,152 n.s.	t(32)= -0,057 n.s.	t(25)= 0,832 n.s.	t(30)= 0,621 n.s.	t(24)= -0,299 n.s.
	Visualisierer	-	-	t(19,718)= -0,211 n.s.	t(21,389)= 0,473 n.s.	t(32)= 0,369 n.s.	t(26)= -0,390 n.s.
B ges	Verbalisierer	-	-	-	t(35)= 1,002 n.s.	t(40)= 0,807 n.s.	t(34)= -0,273 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	t(33)= -0,146 n.s.	t(27)= -1,192 n.s.
C ges	Verbalisierer	-	-	-	-	-	t(32)= -0,949 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 91:** Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg – Verständnis* (Item 23 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (A ges, B ges und C ges) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test).

Beim Erwerb von Faktenwissen profitieren Visualisierer entgegen der Annahme nicht vom Lernen mit Systemdiagrammen. Sie erreichen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *Lernerfolg - Faktenwissen* den kleinsten Mittelwert in der Lerngruppe C ges, die aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert hat. Die Mittelwertsunterschiede sind jedoch nicht signifikant. Beim Verständniserwerb erzielen die Visualisierer den größten Mittelwert in der Lerngruppe C ges. Die Unterschiede zu den Mittelwerten der Gruppen A ges und B ges sind jedoch ebenfalls nicht signifikant. Die Hypothese 5a muss für die Kategorien „Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen“ und „Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis“ abgelehnt werden.

In Bezug auf den Lernzuwachs beim Faktenwissen und beim Verständnis zeigen Versuchspersonen, die der Gruppe der Verbalisierer zugeordnet werden, relativ geringe Mittelwertsunterschiede zwischen den drei Lerngruppen A ges, B ges und C ges. Die Lernumgebung scheint keinen Einfluss auf den Lernzuwachs zu haben. Die Lerngruppen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Innerhalb der Gruppe der Verbalisierer unterscheidet sich die Mittelwerte der Schülerinnen und Schüler, die mit Fluss- und Wirkungsdiagramme gelernt haben (B ges + C ges), ebenfalls nur sehr gering von den Mittelwerten der Personen, die ohne Diagramme gelernt haben (A ges; siehe Tab. 92). Die Unterschiede sind wie erwartet nicht signifikant (Faktenwissen:  $t(52) = -0,283$ ;  $p_\alpha = 0,779$ ; Verständnis:  $t(52) = -0,317$ ;  $p_\alpha = 0,753$ ; siehe Tab. 93). Die  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit ist sowohl beim Faktenwissen als auch beim Verständnis

größer als 20% ( $p_{\alpha} > 0,2$ ). In Bezug auf den  $p_{\alpha}$ -Wert kann die Hypothese 5b für beide Kategorien beibehalten werden. Zur weiteren Überprüfung der gemäß der Nullhypothese formulierten Annahme müssen zusätzlich die  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeiten berechnet werden (Faktenwissen: Effektstärkeindex  $d = 0,0955$ ; Verständnis: Effektstärkeindex  $d = 0,0962$ ). Der  $p_{\beta}$ -Wert ist sowohl für die Kategorie Faktenwissen als auch für die Kategorie Verständnis größer als 5% (Faktenwissen:  $p_{\beta} = 0,9126$ ; Verständnis:  $p_{\beta} = 0,9123$ ). Die Power beträgt beim Faktenwissen 0,0874 (Critical  $t(52) = 1,6747$ ; Delta = 0,2918) und beim Verständnis 0,0877 (Critical  $t(52) = 1,6747$ ; Delta = 0,2939). Die Hypothese 5b ist für beide Kategorien zu verwerfen. Die Ergebnisse liegen somit in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 5b kann für die Kategorien „Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen“ und „Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis“ weder bestätigt noch abgelehnt werden.*

	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen (Item 19 – 22)</i>	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,50	1,243
	<i>B ges + C ges</i>	Verbalisierer	42	0,40	0,964
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis (Item 23 – 31)</i>	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	0,33	1,435
	<i>B ges + C ges</i>	Verbalisierer	42	0,17	1,652

**Tab. 92:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* (Item 19 – 22) und *Lernerfolg – Verständnis* (Item 22 – 31) von Verbalisierern differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges – ohne Diagramme, B ges + C ges – mit Diagrammen*).

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg –Faktenwissen (Item 19 – 22)</i>	<i>A ges</i>	$t(52) = -0,283$ n.s.
	<i>B ges + C ges</i>	
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg –Verständnis (Item 23 – 31)</i>	<i>A ges</i>	$t(52) = -0,317$ n.s.
	<i>B ges + C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 93:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen von Verbalisierern in den Kategorien *Lernerfolg – Faktenwissen* und *Lernerfolg – Verständnis* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges – ohne Diagramme, B ges + C ges – mit Diagrammen*; t-Test).



#### 12.6.4 Hypothesen 5a und 5b: Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde*

Der Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs wird auch in Bezug auf die Kategorie *System Erde* näher untersucht. Der Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* wird nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme* vs. *mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption* vs. *mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach der Lernpräferenz (*Verbalisierer* vs. *Visualisierer*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 94 auf Seite 241, die Mittelwertvergleiche in Abb. 75 auf Seite 242 dargestellt.

	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	2,42	1,730
		Visualisierer	14	2,71	2,128
	<i>B ges</i>	Verbalisierer	22	3,41	2,404
		Visualisierer	15	4,53	1,685
	<i>C ges</i>	Verbalisierer	20	3,05	2,164
		Visualisierer	14	3,29	1,267

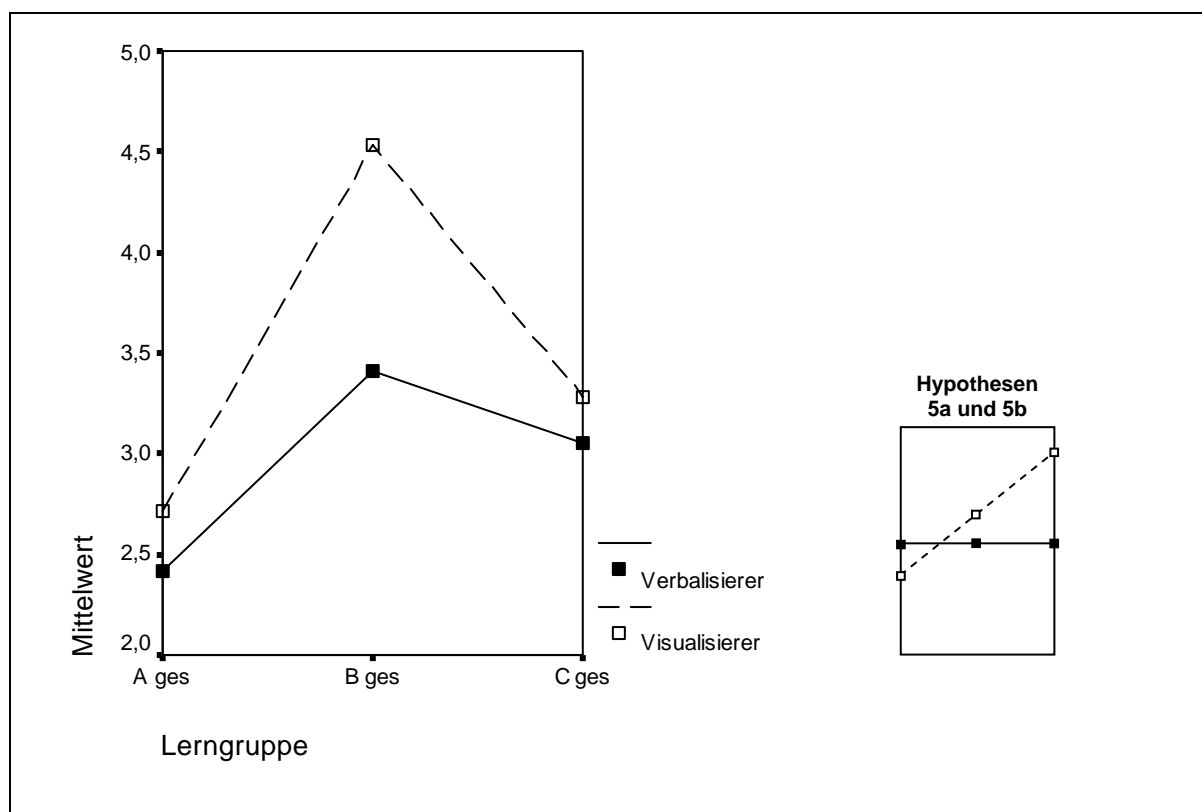
**Tab. 94:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach der Lernpräferenz.

Visualisierer erzielen im Mittel stets größere Lernzuwächse in der Kategorie *System Erde* als Verbalisierer. Sie erreichen den größten Mittelwert ( $M = 4,53$ ), wenn fertige Systemdiagramme in die Lernumgebung integriert sind (*B ges*). In der Lerngruppe *C ges* (aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen) tritt ein größerer Mittelwert ( $M = 3,29$ ) als in der Gruppe *A ges* (ohne Systemdiagramme) auf ( $M = 2,71$ ). Verbalisierer erzielen den größten Mittelwert ( $M = 3,41$ ) bei den Lernzuwächsen in der Kategorie *System Erde* ebenfalls in der Gruppe *B ges* (passive Rezeption von Fluss- und Wirkungsdiagrammen). Zudem zeigt sich in der Gruppe *C ges* ein größerer Mittelwert ( $M = 3,05$ ) als in der Gruppe *A ges* ( $M = 2,42$ ).

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei den Lernzuwächsen bestehen (siehe Abb. 75 auf Seite 242). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Lernpräferenz* für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(1,91) = 1,776$ ;

$p = 0,186$ ). Die Lernpräferenz scheint keinen Einfluss auf den Wissenserwerb in der Kategorie *System Erde* zu haben. Im Hinblick auf die drei Lernumgebungen *A ges*, *B ges* und *C ges* zeigt sich jedoch ein signifikanter Effekt ( $F(2,91) = 3,838$ ;  $p = 0,025$ ). Die Überprüfung der Unterschiede mit Hilfe eines Scheffé-Tests ergibt, dass der Unterschied zwischen dem Lernen ohne Systemdiagramme (*A ges*) und dem Lernen mit fertigen Systemdiagrammen (*B ges*) signifikant ausfällt ( $p = 0,046$ ), der Unterschied zwischen den Gruppen *B ges* und *C ges* bzw. den Gruppen *A ges* und *C ges* jedoch nicht signifikant ist ( $p = 0,323$  bzw.  $p = 0,550$ ).

Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) und *Lernpräferenz* ist nicht signifikant ( $F(2,91) = 0,518$ ; n.s.). Die Einzelvergleiche der Mittelwerte ergeben innerhalb der Gruppe der Verbalisierer keine signifikanten Unterschiede. Innerhalb der Gruppe der Visualisierer treten signifikante Unterschiede auf. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 95 auf Seite 243 aufgeführt.



**Abb. 75:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt.

Summenscore Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44)		A ges		B ges		C ges	
		Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer	Verbalisierer	Visualisierer
A ges	Verbalisiere	-	t(24)= -0,387 n.s.	t(32)= -1,260 n.s.	t(25)= -3,206**.	t(30)= -0,861 n.s.	t(19,881)= -1,440 n.s.
	Visualisierer	-	-	t(34)= -0,883 n.s.	t(24,784)= -2,541*	t(32)= -0,448 n.s.	t(21,186)= -0,863 n.s.
B ges	Verbalisiere	-	-	-	t(35)= -1,565 n.s.	t(40)= 0,507 n.s.	t(33,135)= 0,201 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	t(33)= 2,199*	t(27)= 2,241*
C ges	Verbalisiere	-	-	-	-	-	t(31,221)= -0,399 n.s.
	Visualisierer	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

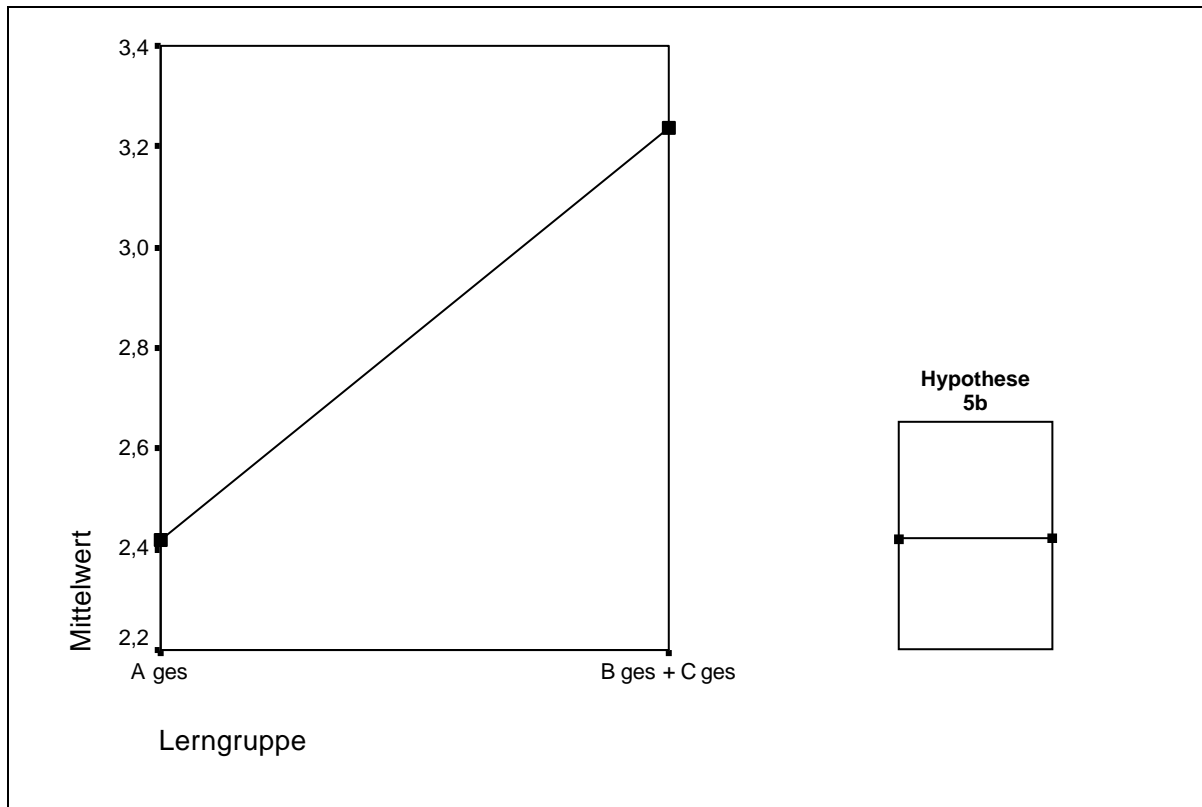
**Tab. 95:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (A ges, B ges und C ges) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test).

Beim Wissenserwerb in der Kategorie *System Erde* profitieren Visualisierer der Annahme entsprechend vom Lernen mit Systemdiagrammen. Sie zeigen den größten Mittelwert bei den Lernzuwächsen in den Gruppen B ges und C ges. Die Mittelwertsunterschiede sind signifikant. *Die Hypothese 5a kann daher für den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ bestätigt werden.*

Lernende, die der Gruppe der Verbalisierer zugeordnet wurden, zeigen wie angenommen beim Wissenserwerb in der Kategorie *System Erde* geringere Mittelwertsunterschiede zwischen den Gruppen A ges, B ges und C ges. Die Lernumgebung (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) scheint keinen Einfluss auf den Lernzuwachs zu haben. Die Mittelwertsunterschiede sind nicht signifikant. Zudem unterscheidet sich innerhalb der Gruppe der Verbalisierer der Mittelwert der Lernenden, die mit Diagrammen gelernt haben (B ges + C ges), relativ gering von dem Mittelwert der Personen, die keine Diagramme genutzt haben (A ges; siehe Tab. 96 und Abb. 76). Der Unterschied ist wie erwartet nicht signifikant ( $p_\alpha = 0,252$ ; siehe Tab. 97). Der  $p_\alpha$ -Wert ist größer als 0,2. Die Hypothese 5b kann somit in Bezug auf den  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit beibehalten werden. Zur Überprüfung der Hypothese muss auch der  $p_\beta$ -Wert berechnet werden. Da dieser größer als 5% ist ( $p_\beta = 0,6943$ ), ist die Hypothese 5b zu verwerfen. Die Ergebnisse liegen somit in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 5b kann für den Lernzuwachs in der Kategorie „System Erde“ weder bestätigt noch abgelehnt werden.*

	Lerngruppe	Lernpräferenz	N	M	SD
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	Verbalisierer	12	2,42	1,730
	<i>B ges + C ges</i>	Verbalisierer	42	3,24	2,272

**Tab. 96:** Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* (Item 32 – 44) von Verbalisierern differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges* – ohne Diagramme, *B ges + C ges* – mit Diagrammen).



**Abb. 76:** Mittelwertvergleich der beiden Lerngruppen *A ges* und *B ges + C ges* in der Kategorie Lernzuwachs/System Erde (Item 32 – 44) von Verbalisierern. Rechts ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 5b vermutet worden ist, dargestellt.

Differenz NT – VT	Lerngruppe	Signifikanz
Summenscore <i>Lernzuwachs/ System Erde</i> (Item 32 – 44)	<i>A ges</i>	t(52)=-1,157 n.s.
	<i>B ges + C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 97:** Unterschiede bei den Lernzuwächsen von Verbalisierern in der Kategorie *System Erde* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges* – ohne Diagramme, *B ges + C ges* – mit Diagrammen; t-Test).

### 12.6.5 Zusammenfassung

In Kapitel 12.6 ist der Einfluss der Lernpräferenz (*Verbalisierer* vs. *Visualisierer*) auf das Lernen untersucht worden. Visualisierer profitieren, wie angenommen, stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen als Verbalisierer. Dieses Ergebnis bezieht sich jedoch auf die Kategorie *System Erde*, nicht jedoch auf die Kategorie *Lernerfolg*, die das grundlegende chemische, physikalisch-chemische und systemtheoretische Wissen beinhaltet.

Die Hypothese „Verbalisierer lernen ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut wie mit Systemdiagrammen“ kann weder bestätigt noch abgelehnt werden. Dieses Ergebnis bezieht sich sowohl auf die Kategorie *System Erde* als auch auf die Kategorie *Lernerfolg*.

### 12.7 Kognitive Belastung

In dieser Arbeit soll auch der Einfluss des Vorwissens (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) und der Einfluss der Lernumgebung (*A 1* vs. *A 2* vs. *B 1* vs. *B 2* vs. *C 1* vs. *C 2*) auf die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung (abhängige Variable) untersucht werden. Die bereits auf Seite 93 formulierten Hypothesen lauten:

Hypothese 6a                      *Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad sind geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.*

Hypothese 6b                      *Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen, wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebungen (Einsatz von Systemdiagrammen: ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion; Anzahl inhaltlicher Perspektiven: uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch) nicht auf die kognitive Belastung aus.*

Hypothese 6c                      *Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sind stärker kognitiv belastet, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.*

### 12.7.1 Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und systemischer Darstellungsformen

Die von den Schülerinnen und Schülern subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung wird nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen vs. hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 98 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 77 auf Seite 247 dargestellt.

	Lerngruppe	Vorwissensgrad	N	M	SD
<i>Kognitive Belastung</i>	<i>A ges</i>	gering	17	3,647	0,6336
		hoch	11	3,018	0,6838
	<i>B ges</i>	gering	30	3,513	0,7551
		hoch	7	2,800	0,3512
	<i>C ges</i>	gering	19	3,321	0,5855
		hoch	15	3,007	0,5405

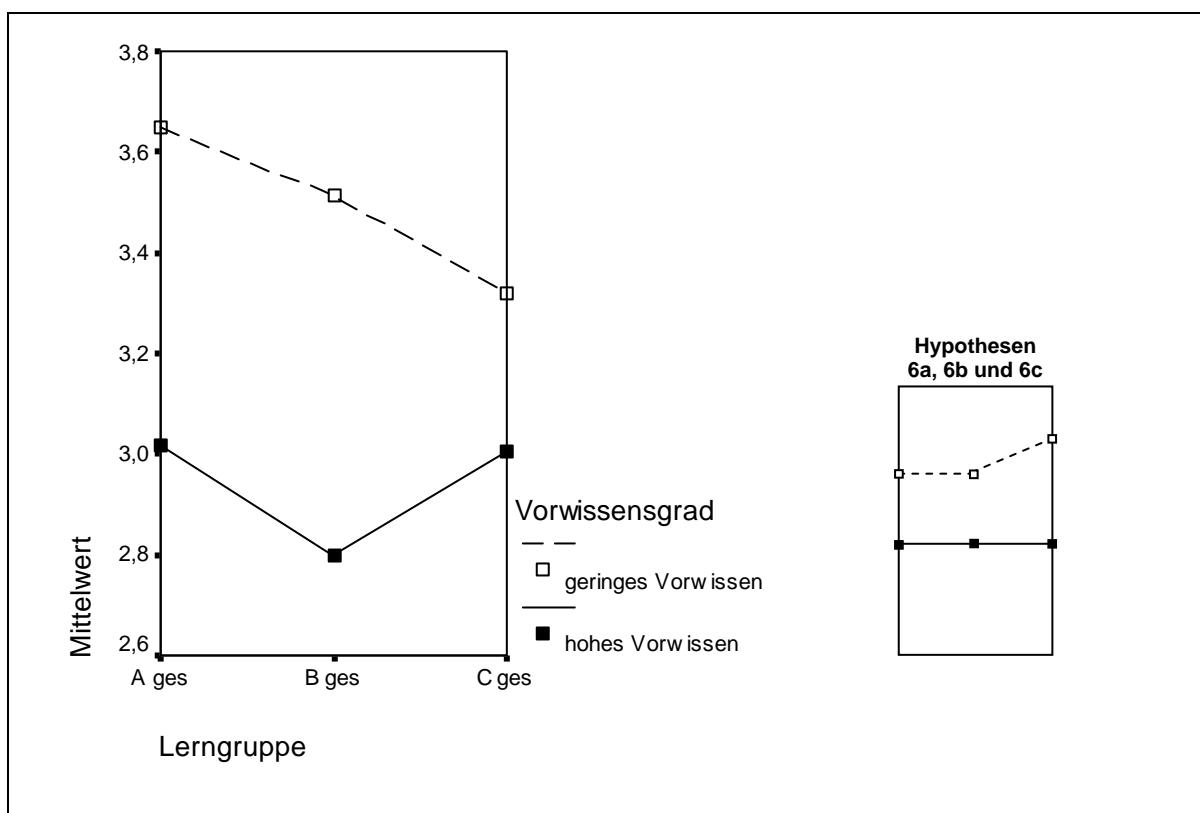
**Tab. 98:** Deskriptive Statistiken für die Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen fühlen sich im Vergleich zu Lernenden mit hohem Vorwissen stärker kognitiv belastet. Sie erreichen für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* den größten Mittelwert ( $M = 3,647$ ), wenn sie ohne Systemdiagramme gelernt haben (*A ges*). Im Mittel wird die geringste kognitive Belastung ( $M = 3,321$ ) beim eigenständigen Konstruieren von Fluss- und Wirkungsdiagrammen (*C ges*) empfunden.

Versuchspersonen mit hohem Vorwissen schätzen ihre kognitive Belastung geringer ein. Den kleinsten Mittelwert ( $M = 2,800$ ) erzielen Lernende, die mit fertigen Systemdiagrammen gearbeitet haben (*B ges*). Schülerinnen und Schüler, die ohne Diagramme gelernt haben (*A ges*) bzw. eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben (*C ges*), erreichen etwas höhere Mittelwerte ( $M = 3,018$  bzw.  $M = 3,007$ ).

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung bestehen. Die Berechnung mit den Fak-

toren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* zeigt einen höchst signifikanten Haupteffekt ( $F(1,93) = 14,838$ ;  $p = 0,000$ ). Versuchspersonen mit hohem Vorwissen fühlen sich geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen. Der Einfluss der Lerngruppe (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) ist hingegen nicht signifikant ( $F(2,93) = 0,643$ ;  $p = 0,528$ ). Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen)* und *Vorwissensgrad* ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(2,93) = 0,777$ ;  $p = 0,463$ ). Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tab. 99 auf Seite 248 dargestellt.



**Abb. 77:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt.

<i>Kognitive Belastung</i>		<i>A ges</i>		<i>B ges</i>		<i>C ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>A ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(26)= 2,487*	t(45)= 0,617 n.s.	t(19,634)= 4,172**	t(34)= 1,604 n.s.	t(29,974)= 3,085**
	Hohes Vorwissen	-	-	t(39)= -1,905°	t(15,554)= 0,890 n.s.	t(28)= -1,284 n.s.	t(24)= 0,048 n.s.
<i>B ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(20,895)= 3,727**	t(47)= 0,944 n.s.	t(37,444)= 2,583*
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(18,215)= -2,759*	t(17,454)= -1,073 n.s.
<i>C ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(32)= 1,607 n.s.
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

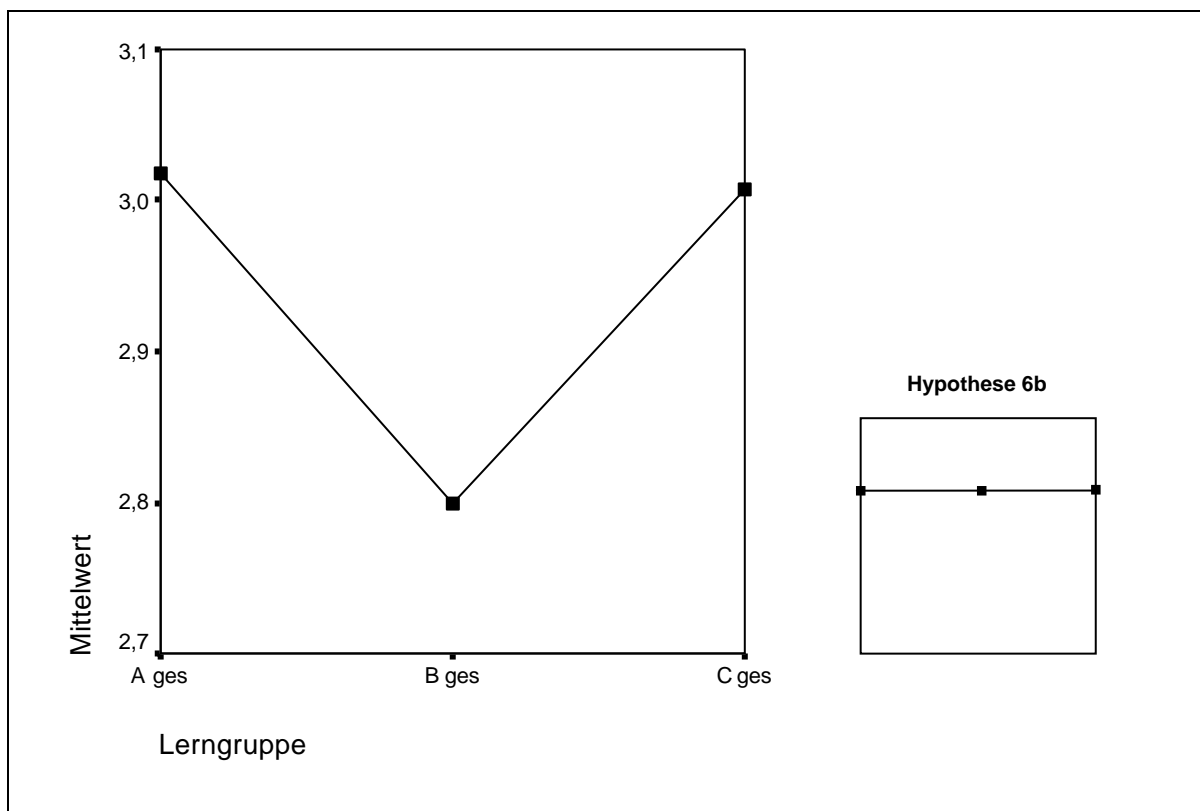
**Tab. 99:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

Die Mittelwerte der Lernenden mit geringem Vorwissen unterscheiden sich jedoch größtenteils (hoch) signifikant von den Mittelwerten der Lernenden mit hohem Vorwissen. Innerhalb der Lerngruppe *A ges*, die ohne Diagramme gearbeitet hat, zeigen die Gruppen *Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen* einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,020$ ). Bei den Schülerinnen und Schülern, die mit fertigen Systemdiagrammen gelernt haben (*B ges*), ist der Mittelwert derjenigen mit geringem Vorwissen von dem Wert derjenigen mit hohem Vorwissen sogar hoch signifikant verschieden ( $p = 0,001$ ). Innerhalb der Lerngruppe *C ges*, die eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert hat, unterscheiden sich die Gruppen *Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen* nicht signifikant voneinander ( $p = 0,118$ ). Der Wert verfehlt jedoch nur knapp das 10%-Niveau. Insgesamt fällt die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissensgrad signifikant kleiner aus als bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen. *Die Hypothese 6a kann somit bezüglich des Lernens innerhalb der drei Lerngruppen A ges, B ges und C ges bestätigt werden.*

Innerhalb der nach dem Vorwissensgrad differenzierten Gruppen (*Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen*) hat die Form des Einsatzes von Fluss- und Wirkungsdiagrammen anscheinend keinen Einfluss auf die Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung. Bei den Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen zeigen die Mittelwerte der Lerngruppen *A ges* und *B ges* ( $p = 0,387$ ), die der Lerngruppen *A ges* und *C ges* ( $p = 0,962$ ) und die der



Lerngruppen *B ges* und *C ges* ( $p = 0,298$ ) paarweise keine signifikanten Unterschiede. Somit wirkt sich bei Lernenden mit hohem Vorwissen die Gestaltung der Lernumgebungen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen vermutlich nicht auf die kognitive Belastung aus. Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wird für Lernende mit hohem Vorwissen überprüft, ob Unterschiede zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung bestehen (siehe Abb. 78). Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Einsatz von Systemdiagrammen*) für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* zeigt keinen signifikanten Haupteffekt ( $F(2,30) = 0,391$ ;  $p_\alpha = 0,680$ ). Zwischen den Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* bestehen paarweise keine signifikanten Unterschiede. Die Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben sind in Tab. 100 dargestellt. Die  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit ist mit 0,680 jedoch größer als 20%. Somit kann die Hypothese 6b in Bezug auf den  $p_\alpha$ -Wert beibehalten werden. Zur Überprüfung der Nullhypothese muss aber auch der  $p_\beta$ -Wert berechnet werden (Effektstärkeindex  $f = 0,1569$ ). Da dieser größer als 5% ist ( $p_\beta = 0,8904$ ), ist die Hypothese 6b zu verwerfen. Die Power beträgt 0,1096 (Critical  $F(2,30) = 3,3158$ ;  $\Lambda = 0,8124$ ). Die Ergebnisse liegen in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 6b kann weder bestätigt noch abgelehnt werden.*



**Abb. 78:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* in der Kategorie *Kognitive Belastung* für Versuchspersonen mit hohem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in Hypothese 6b vermutet worden ist, dargestellt.

	Lerngruppe	Signifikanz
<i>Kognitive Belastung</i>	<i>A ges</i>	t(15,554)=0,890 n.s.
	<i>B ges</i>	
	<i>A ges</i>	t(24)=0,048 n.s.
	<i>C ges</i>	
	<i>B ges</i>	t(17,454)=-1,073 n.s.
	<i>C ges</i>	

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 100:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) für Versuchspersonen mit hohem Vorwissensgrad (t-Test).

Auch bei den Versuchspersonen mit geringem Vorwissen unterscheiden sich die Mittelwerte der Lerngruppen *A ges* und *B ges* ( $p = 0,541$ ), die der Lerngruppen *A ges* und *C ges* ( $p = 0,118$ ) und die der Lerngruppen *B ges* und *C ges* ( $p = 0,350$ ) paarweise nicht signifikant voneinander. Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sind entgegen der Annahme weniger kognitiv belastet, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren. Die Mittelwertunterschiede der Lernzuwächse zwischen den drei Lerngruppen *A ges*, *B ges* und *C ges* sind jedoch nicht signifikant. *Die Hypothese 6c muss für das Lernen innerhalb der drei Lerngruppen A ges, B ges und C ges abgelehnt werden.*

Die Variable *Kognitive Belastung* korreliert schwach signifikant negativ mit der abhängigen Variablen *Lernzuwachs/System Erde* (siehe Tab. 101). Schülerinnen und Schüler, die einen relativ hohen Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* aufweisen, schätzen ihre kognitive Belastung relativ gering ein. Die Korrelation zwischen der Variablen *Kognitive Belastung* und dem Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* ist dagegen nicht signifikant.

	<i>Kognitive Belastung</i>		
	r	p	N
<i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31)	-0,031 n.s.	0,758	99
<i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44)	-0,193°	0,056	99

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 101:** Korrelationen nach Pearson zwischen *Lernzuwachs* und *Kognitiver Belastung*.

### 12.7.2 Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und mehrperspektivischen Wissens

Die von den Schülerinnen und Schülern subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung wird nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 102 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 79 auf Seite 252 dargestellt.

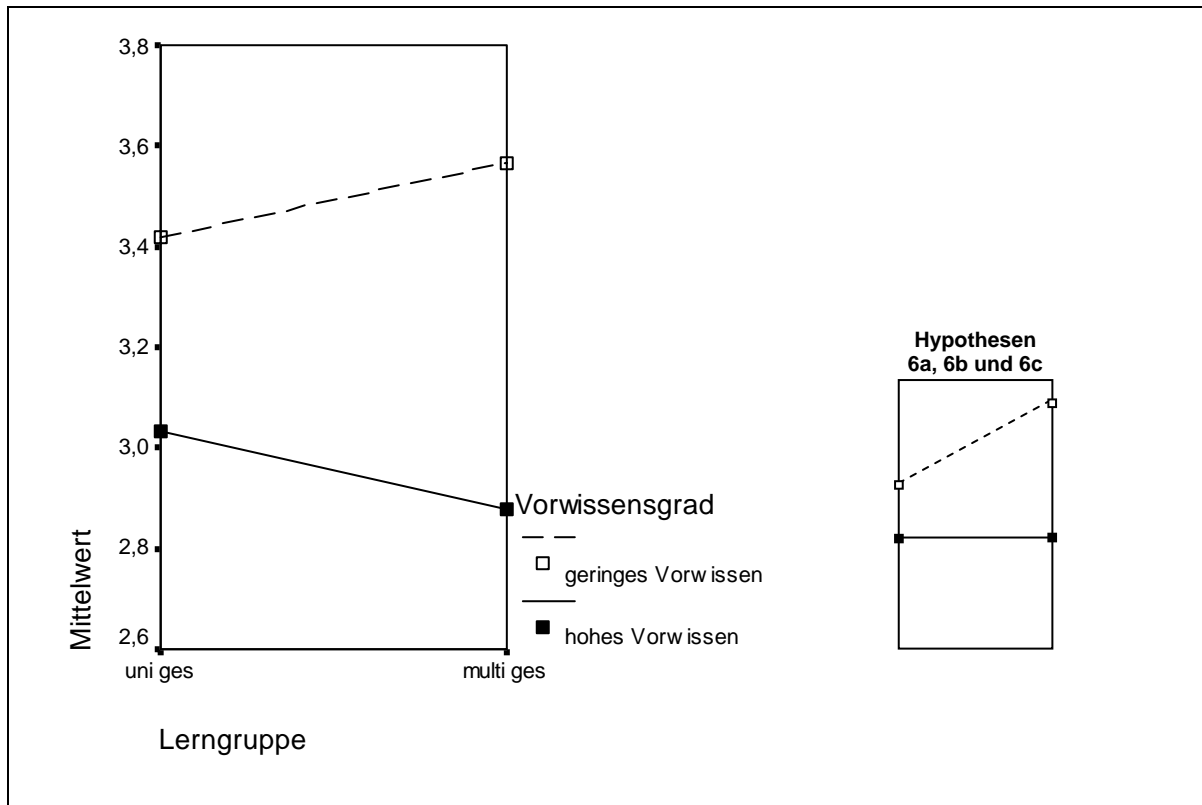
	Lerngruppe	Vorwissensgrad	N	M	SD
<i>Kognitive Belastung</i>	<i>uni ges</i>	gering	33	3,418	0,6738
		hoch	19	3,032	0,6111
	<i>multi ges</i>	gering	33	3,567	0,6895
		hoch	14	2,879	0,4677

**Tab. 102:** Deskriptive Statistiken für die Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) und nach dem Vorwissensgrad.

Innerhalb der beiden Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* nehmen Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen die kognitive Belastung im Mittel größer wahr (M = 3,418 bzw. M = 3,567) als Lernende mit hohem Vorwissen (M = 3,032 bzw. M = 2,879).

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den beiden Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung bestehen. Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* (*Anzahl inhaltlicher Perspektiven*) und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* zeigt einen höchst signifikanten Haupteffekt ( $F(1,95) = 15,116$ ;  $p = 0,000$ ). Versuchspersonen mit hohem Vorwissen fühlen sich geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen.

Der Einfluss der Lerngruppe (*uni-perspektivisch* vs. *zwei-perspektivisch*) ist hingegen nicht signifikant ( $F(1,95) = 0,000$ ; n.s.). Die Lernumgebung hat demnach keinen Einfluss auf die Selbstwahrnehmung der kognitiven Belastung. Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* (*Anzahl inhaltlicher Perspektiven*) und *Vorwissensgrad* ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(1,95) = 1,190$ ;  $p = 0,278$ ). Die Ergebnisse der Einzelvergleiche mit Hilfe von t-Tests sind in Tab. 103 auf Seite 252 dargestellt.



**Abb. 79:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* in der Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt.

<i>Kognitive Belastung</i>		<i>uni ges</i>		<i>multi ges</i>	
		Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen	Geringes Vorwissen	Hohes Vorwissen
<i>uni ges</i>	Geringes Vorwissen	-	t(50)= 2,059*	t(64)= -0,885 n.s.	t(45)= 2,723**
	Hohes Vorwissen	-	-	t(50)= -2,805**	t(31)= 0,782 n.s.
<i>multi ges</i>	Geringes Vorwissen	-	-	-	t(35,697)= 3,971***
	Hohes Vorwissen	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$ ; \*\*\*\*  $p < 0,001$

**Tab. 103:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven (*uni ges* und *multi ges*) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).

Die Mittelwerte der Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen unterscheiden sich größtenteils (hoch) signifikant von den Mittelwerten der Lernenden mit hohem Vorwissen. Innerhalb der Lerngruppe, die uni-perspektivisches Material genutzt hat (*uni ges*), zeigen die Gruppen *Geringes Vorwissen* und *Hohes Vorwissen* einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,045$ ). Bei den Schülerinnen und Schülern der Gruppe *multi ges*, die zwei-perspektivisches Lernmaterial bearbeitet haben, ist der Mittelwert derjenigen mit geringem Vorwissen von dem Wert derjenigen mit hohem Vorwissen sogar höchst signifikant verschieden ( $p = 0,000$ ). Insgesamt fällt die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissensgrad signifikant kleiner aus als bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen. *Die Hypothese 6a kann somit bezüglich des Lernens innerhalb der beiden Lerngruppen uni ges und multi ges bestätigt werden.*

Innerhalb der Gruppe *Hohes Vorwissen* unterscheiden sich die Mittelwerte der Lerngruppen *uni ges* und *multi ges* wie erwartet nicht signifikant voneinander ( $t(31) = 0,782$ ;  $p_\alpha = 0,440$ ; siehe Tab. 103). Die  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit ist jedoch größer als 0,2. Die Hypothese 6b kann somit in Bezug auf den  $p_\alpha$ -Wert beibehalten werden. Zur Überprüfung der Nullhypothese muss aber auch der  $p_\beta$ -Wert berechnet werden (Effektstärkeindex  $d = 0,2771$ ). Da die  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit größer als 5% ist ( $p_\beta = 0,8093$ ), ist die Hypothese 6b zu verwerfen. Die Power beträgt 0,1907 (Critical  $t(31) = 1,6955$ ; Delta = 0,7867). Die Ergebnisse liegen in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 6b kann bezüglich des Lernens innerhalb der beiden Lerngruppen uni ges und multi ges weder bestätigt noch abgelehnt werden.*

Innerhalb der Gruppe *Geringes Vorwissen* hat die Lernumgebung (Anzahl der inhaltlichen Perspektiven) keinen Einfluss auf die Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung. *Die Hypothese 6c muss bezüglich des Lernens innerhalb der beiden Lerngruppen uni ges und multi ges abgelehnt werden.*

### **12.7.3 Hypothesen 6a, 6b und 6c: Einfluss des Vorwissens und der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens**

Die von den Schülerinnen und Schülern subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung wird nach allen sechs Lerngruppen (*A 1* vs. *A 2* vs. *B 1* vs. *B 2* vs. *C 1* vs. *C 2*) und nach dem Vorwissensgrad (*geringes Vorwissen* vs. *hohes Vorwissen*) differenziert betrachtet. Die deskriptiven Statistiken sind in Tab. 104 zusammengefasst. Die Mittelwertvergleiche sind in Abb. 80 auf Seite 255 dargestellt.

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen fühlen sich im Vergleich zu Lernenden mit hohem Vorwissen stärker kognitiv belastet. Den größten Mittelwert ( $M = 3,886$ ) für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* erreichen sie, wenn sie mit fertigen System-

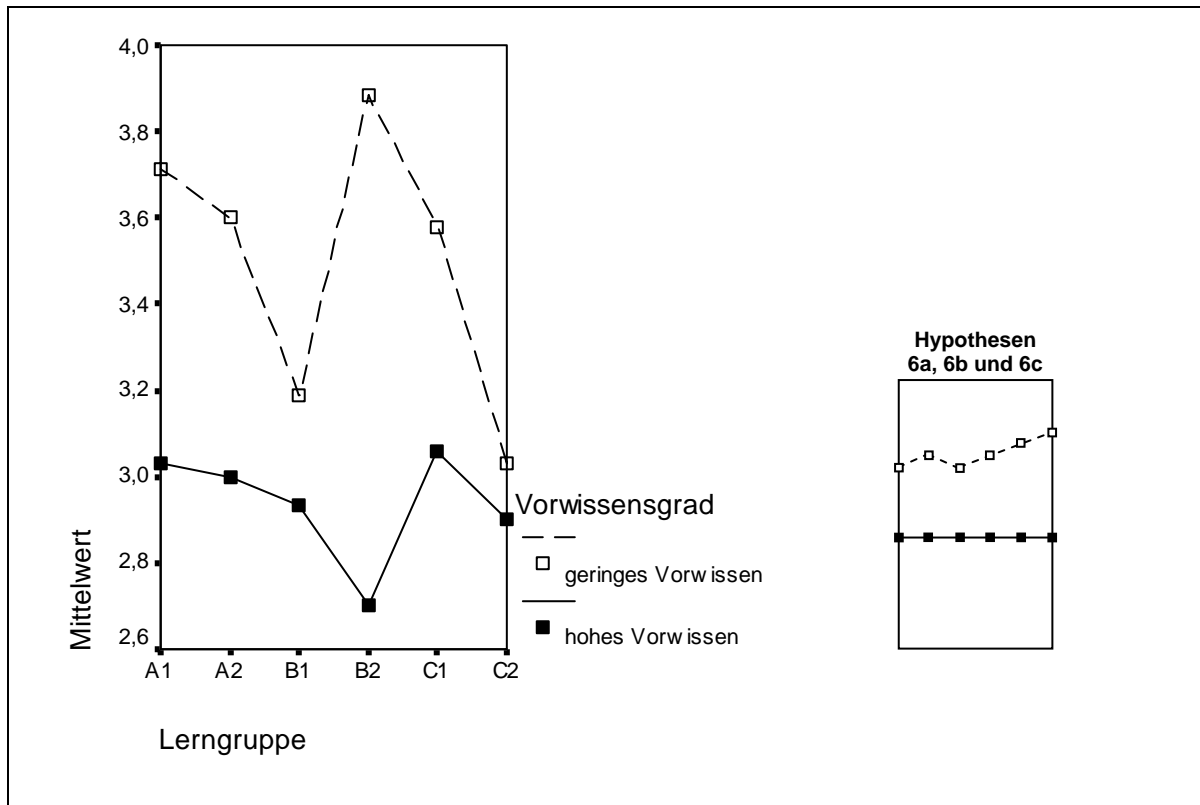
diagrammen und mit zweiperspektivischem Material gelernt haben (*B 2*). Die geringste kognitive Belastung ( $M = 3,321$ ) wird im Mittel beim eigenständigen Konstruieren von Fluss- und Wirkungsdiagrammen und der Verwendung von zweiperspektivischen Vertiefungstexten (*C 2*) empfunden.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* in allen sechs Lerngruppen Mittelwerte, die sich relativ gering unterscheiden. Im Mittel fühlen sie sich die Schülerinnen und Schüler am wenigsten kognitiv belastet, wenn sie mit fertigen Systemdiagrammen und mit zweiperspektivischem Material gelernt haben (*B 2*). Die kognitive Belastung beim Lernen mit aktiver Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen und mit einperspektivischen Vertiefungstexten (*C 1*) wird als relativ hoch empfunden.

	Lerngruppe	Vorwissen	N	M	SD
<i>Kognitive Belastung</i>	<i>A 1</i>	gering	7	3,714	0,5146
		hoch	6	3,033	0,7501
	<i>A 2</i>	gering	10	3,600	0,7288
		hoch	5	3,000	0,6819
	<i>B 1</i>	gering	16	3,188	0,8032
		hoch	3	2,933	0,5508
	<i>B 2</i>	gering	14	3,886	0,4975
		hoch	4	2,700	0,1155
	<i>C 1</i>	gering	10	3,580	0,4131
		hoch	10	3,060	0,6022
	<i>C 2</i>	gering	9	3,033	0,6344
		hoch	5	2,900	0,4301

**Tab. 104:** Deskriptive Statistiken für die Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach Lerngruppen (*A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2*) und nach dem Vorwissensgrad.

Anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wird überprüft, ob Unterschiede zwischen den sechs Lerngruppen *A 1*, *A 2*, *B 1*, *B 2*, *C 1* und *C 2* bezüglich der erreichten Mittelwerte bei der subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung bestehen (siehe Abb. 80 auf Seite 255). Die Ergebnisse der Einzelvergleiche mit Hilfe von t-Tests sind in Tab. 105 und Tab. 106 auf Seite 256 sowie in Tab. 107 auf Seite 257 dargestellt.



**Abb. 80:** Mittelwertvergleich der Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 in der Kategorie *Kognitive Belastung* differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt.

Die Berechnung mit den Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* für die abhängige Variable *Kognitive Belastung* zeigt einen höchst signifikanten Haupteffekt ( $F(1,87) = 16,163$ ;  $p = 0,000$ ). Der Einfluss der Lerngruppe (Einsatz von Systemdiagrammen: ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion; Anzahl inhaltlicher Perspektiven: uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch) ist nicht signifikant ( $F(5,87) = 0,900$ ; n.s.). Die Lernumgebung hat demnach keinen Einfluss auf die Selbstwahrnehmung der kognitiven Belastung. Der Interaktionseffekt der beiden Faktoren *Lerngruppe* und *Vorwissensgrad* ist ebenfalls nicht signifikant ( $F(5,87) = 1,096$ ;  $p = 0,369$ ).

In allen sechs Lerngruppen fühlen sich Versuchspersonen mit hohem Vorwissen geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen. Innerhalb der Lerngruppe A 2, B 1 und C 2 unterscheiden sich die Mittelwerte der Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen nicht signifikant von den Werten der Versuchspersonen mit hohem Vorwissen (siehe Tab. 105). In der Gruppe, die ohne Systemdiagramme und mit uni-perspektivischem Material gelernt hat (A 1), ist der Mittelwertsunterschied hingegen schwach signifikant ( $t(11) = 1,935$ ;  $p = 0,079$ ). Innerhalb der Lerngruppe C 1 unterscheidet sich der Mittelwert der Lernenden mit geringem Vorwissen signifikant von dem der Lernenden mit hohem Vorwissen ( $t(18) = 2,252$ ;  $p = 0,037$ ). Der größte Mittelwertsun-

terschied tritt in der Gruppe auf, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Material genutzt hat (B 2). Dieser Unterschied ist höchst signifikant ( $t(15,913) = 8,180$ ;  $p = 0,000$ ). Die Hypothese 6a kann bestätigt werden.

<i>Kognitive Belastung</i>	A 1 hohes Vorwissen	A 2 hohes Vorwissen	B 1 hohes Vorwissen	B 2 hohes Vorwissen	C 1 hohes Vorwissen	C 2 hohes Vorwissen
A 1 geringes Vorwissen	t(11)= 1,935°	-	-	-	-	-
A 2 geringes Vorwissen	-	t(13)= 1,533 n.s.	-	-	-	-
B 1 geringes Vorwissen	-	-	t(17)= 0,519 n.s.	-	-	-
B 2 geringes Vorwissen	-	-	-	t(15,913)= 8,180***	-	-
C 1 geringes Vorwissen	-	-	-	-	t(18)= 2,252*	-
C 2 geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(12)= 0,416 n.s.

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$ ; \*\*\*\*  $p < 0,001$

**Tab. 105:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen und den Schülerinnen und Schüler mit hohem bzw. geringem Vorwissen (t-Test).

<i>Kognitive Belastung</i>	A 1 hohes Vorwissen	A 2 hohes Vorwissen	B 1 hohes Vorwissen	B 2 hohes Vorwissen	C 1 hohes Vorwissen	C 2 hohes Vorwissen
A 1 hohes Vorwissen	-	t(9)= 0,076 n.s.	t(7)= 0,202 n.s.	t(5,351)= 1,070 n.s.	t(14)= -0,078 n.s.	t(9)= 0,350 n.s.
A 2 hohes Vorwissen	-	-	t(6)= 0,142 n.s.	t(4,285)= 0,967 n.s.	t(13)= -0,174 n.s.	t(6,748)= 0,277 n.s.
B 1 hohes Vorwissen	-	-	-	t(2,132)= 0,722 n.s.	t(11)= -0,324 n.s.	t(6)= 0,096 n.s.
B 2 hohes Vorwissen	-	-	-	-	t(10,465)= -1,809°	t(4,702)= -0,996 n.s.
C 1 hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	t(13)= 0,526 n.s.
C 2 hohes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ; °  $p \leq 0,1$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$

**Tab. 106:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen, bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test).



Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebungen nicht auf die Selbstwahrnehmung der kognitiven Belastung aus ( $F(5,27) = 0,249$ ;  $p_\alpha = 0,937$ ). Lediglich der größte und der kleinste Mittelwert weisen einen schwach signifikanten Unterschied auf ( $t(10,465) = -1,809$ ;  $p = 0,099$ ). Die übrigen Mittelwerte unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (siehe Tab. 106 auf Seite 256). Die  $\alpha$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit ist jedoch größer als 0,2. Somit kann die Hypothese 6b in Bezug auf den  $p_\alpha$ -Wert beibehalten werden. Um die Nullhypothese zu überprüfen, muss der  $p_\beta$ -Wert berechnet werden (Effektstärke  $f = 0,2065$ ). Da die  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit größer als 5% ist ( $p_\beta = 0,8926$ ), ist die Hypothese 6b zu verwerfen. Die Power beträgt 0,1074 (Critical  $F(5,27) = 2,5719$ ;  $\Lambda = 1,4072$ ). Die Ergebnisse liegen in einem statistischen Indifferenzbereich. *Die Hypothese 6b kann bezüglich des Lernens innerhalb der sechs Lerngruppen A 1, A 2, B 1, B 2, C 1 und C 2 weder bestätigt noch abgelehnt werden.*

<i>Kognitive Belastung</i>	A 1 geringes Vorwissen	A 2 geringes Vorwissen	B 1 geringes Vorwissen	B 2 geringes Vorwissen	C 1 geringes Vorwissen	C 2 geringes Vorwissen
A 1 geringes Vorwissen	-	$t(14,984) = 0,379$ n.s.	$t(21) = 1,587$ n.s.	$t(19) = -0,736$ n.s.	$t(15) = 0,597$ n.s.	$t(14) = 2,306^*$
A 2 geringes Vorwissen	-	-	$t(24) = 1,318$ n.s.	$t(14,849) = -1,074$ n.s.	$t(14,243) = 0,075$ n.s.	$t(17) = 1,798^\circ$
B 1 geringes Vorwissen	-	-	-	$t(25,401) = -2,899^{**}$	$t(23,399) = -1,638$ n.s.	$t(23) = 0,494$ n.s.
B 2 geringes Vorwissen	-	-	-	-	$t(22) = 1,589$ n.s.	$t(21) = 3,603^{**}$
C 1 geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	$t(17) = 2,249^*$
C 2 geringes Vorwissen	-	-	-	-	-	-

n.s.  $p > 0,1$ ;  $^\circ p \leq 0,1$ ;  $* p \leq 0,05$ ;  $** p \leq 0,01$ ;  $*** p \leq 0,001$

**Tab. 107:** Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie *Kognitive Belastung* zwischen den Lerngruppen, bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test).

Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sind entgegen der Annahme nicht am stärksten kognitiv belastet, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen (siehe Tab. 107). Innerhalb der beiden Lerngruppen B 1 und B 2, die fertige Systemdiagramme genutzt haben, zeigt sich ein hoch signifikanter Unterschied zwischen der kognitiven Belastung bei ein-perspektivischem und der bei zwei-perspektivischem Material ( $t(25,401) = -2,899$ ;  $p = 0,008$ ). Zwei-perspektivische Vertiefungstexte führen hier dazu, dass die kognitive Belastung stärker empfunden wird. Die Lerngruppen C 1 und C 2, die eigenständig Systemdiagramme kon-

struiert haben, zeigen hingegen eine höhere selbst wahrgenommene kognitive Belastung beim Lernen mit ein-perspektivischem Material. Dieser Unterschied ist signifikant ( $t(17) = 2,249$ ;  $p = 0,038$ ). *Die Hypothese 6c muss abgelehnt werden.*

#### 12.7.4 Zusammenfassung

In Kapitel 12.7 ist der Einfluss des Vorwissens (*geringes Vorwissen vs. hohes Vorwissen*) und der Einfluss der Lernumgebung (*A 1 vs. A 2 vs. B 1 vs. B 2 vs. C 1 vs. C 2*) auf die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung untersucht worden. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad sind, wie angenommen, geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Lernumgebung.

Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebungen (Einsatz von Systemdiagrammen: *ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*; Anzahl inhaltlicher Perspektiven: *uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch*) vermutlich nicht auf die kognitive Belastung aus.

Die Annahme, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen stärker kognitiv belastet sind, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen, konnte nicht bestätigt werden. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen weisen im Mittel die geringste kognitive Belastung auf, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren und zwei-perspektivisches Material nutzen. Bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) sind sie tendenziell am stärksten kognitiv belastet, wenn sie ohne Systemdiagramme lernen, und am schwächsten, wenn sie aktiv Konstruieren.

## 12.8 Latente Klassenanalyse (LCA)

Die varianzanalytischen Ergebnisse zeigen bezüglich der Kategorie *Lernerfolg* im Gegensatz zur Kategorie *System Erde* sehr geringe Lernzuwächse. Dementsprechend minimal sind die Mittelwertsunterschiede zwischen den verschiedenen Lerngruppen ausgefallen. Dies legt die Vermutung nahe, dass quantifizierende Testverfahren nur bedingt geeignet sind den Lernzuwachs für Kategorie *Lernerfolg* in der Stichprobe aufzuklären. Aus diesem Grund wird für die abhängige Variable *Lernzuwachs/Lernerfolg* eine latente Klassenanalyse (LCA) durchgeführt. Mit Hilfe dieser klassifizierenden Testauswertungsmethode können zusätzlich qualitative Personenunterschiede über das Profil der Itemantworten ermittelt werden. In Kapitel 12.8.1.1 wird zunächst die Modellgeltung überprüft und ein Testmodell ausgewählt. In Kapitel 12.8.1.2 auf Seite 260 ff. wird das geeignetere 3-Klassen-LCA-Modell präsentiert. Im Anhang sind weitere Ergebnisse des 3-Klassen-LCA-Modells (siehe D.1.1 auf Seite 361 ff.) und das 2-Klassen-LCA-Modell dargestellt (siehe Kapitel D.1.2 auf Seite 368 ff.). Für die abhängige Variable *Lernzuwachs/System Erde* wird ebenfalls eine latente Klassenanalyse (LCA) durchgeführt. Diese wird in Kapitel 12.8.2 auf Seite 265 ff. beschrieben.

### 12.8.1 LCA für die Kategorie *Lernerfolg*

#### 12.8.1.1 Modellgeltung und Auswahl des Testmodells für die Analyse der Kategorie *Lernerfolg*

Es wurden zwei klassifizierende Testmodelle auf ihre Geltung überprüft, eines mit zwei latenten Klassen (2-Klassen-LCA-Modell) und eines mit drei latenten Klassen (3-Klassen-LCA-Modell). Die Modellgeltungsindices sind in Tab. 108 aufgeführt. Gemäß dem BIC- und dem CAIC-Index bildet das 2-Klassen-Modell die Daten besser ab als das 3-Klassen-Modell (Rost, 1996). Aufgrund der Itemprofile wird im Folgenden nicht das beste Modell mit zwei latenten Klassen sondern das zweitbeste klassifizierende Modell mit drei Klassen analysiert.

Modell	BIC-Index	CAIC-Index
Klassifizierendes Modell mit zwei latenten Klassen (2-Klassen-LCA-Modell)	2793,00	2820,00
Klassifizierendes Modell mit drei latenten Klassen (3-Klassen-LCA-Modell)	2814,08	2855,08

Tab. 108: Geltung ausgewählter LCA-Modelle.

### 12.8.1.2 3-Klassen-LCA-Modell

Obwohl gemäß der Modellgeltungsindices BIC und CAIC das 2-Klassen-Modell vorrangig auszuwählen ist, kann das 3-Klassen-Modell besser interpretiert werden. Die Analyse des Modells für drei latente Klassen ist aufgrund der Itemprofile aufschlussreicher.

#### 12.8.1.2.1 Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 3-Klassen-LCA-Modells

Die geringste Wahrscheinlichkeit, einer der beiden Klassen zugeordnet zu werden, beträgt 33,3 %. In diesem Fall wäre das Antwortmuster der Versuchsperson keiner der drei Klassen eindeutig zuzuweisen. Die geringste Wahrscheinlichkeit, mit der eine Schülerin bzw. ein Schüler dieser Studie einer Klasse zugeordnet wurde, beträgt 38,31 %. 66,7 % wurden einer der drei Klassen mit einer Wahrscheinlichkeit von > 90 %, 41,7 % mit einer Wahrscheinlichkeit von > 99 % und 9,8 % mit einer Wahrscheinlichkeit von > 99,9 % zugewiesen. Die mittleren maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten (siehe Tab. 109) liegen in allen drei Fällen über 88 %. Die alternativen Zuordnungswahrscheinlichkeiten liegen stets unter 10 %. Demnach bildet das 3-Klassen-LCA-Modell die Daten zuverlässig ab.

Klasse	Erwartete Größe		Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 1	Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 2	Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 3
	N	N [%]			
1	111	54,5	91,8 %	6,7 %	1,5 %
2	50	24,6	1,9 %	88,6 %	9,5 %
3	43	20,9	4,5 %	5,2 %	90,2 %
Gesamt	204 <sub>50</sub>	100			

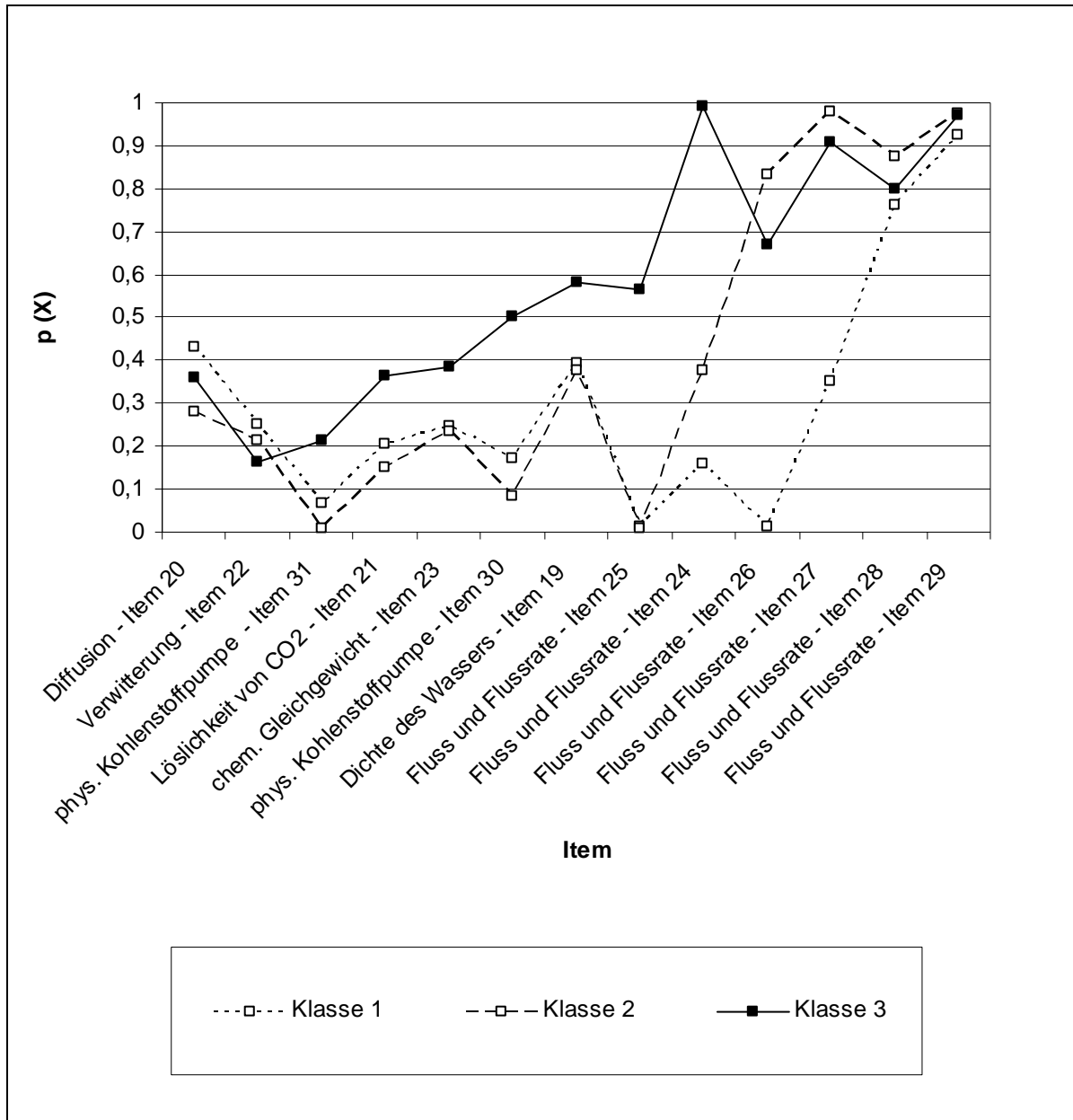
**Tab. 109:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 3-Klassen-LCA-Modells.

---

<sup>50</sup> Die Datensätze aus Vor- und Nachtest wurden vor der Modellierung zusammengefügt. Daher ergeben sich 204 Versuchspersonen ( $N = 102 \cdot 2 = 204$ ).

### 12.8.1.2.2 Itemprofile des 3-Klassen-LCA-Modells

In Folgenden werden die Itemprofile der drei latenten Klassen graphisch dargestellt (siehe Abb. 81 auf Seite 261) und erläutert. In der *Klasse 1* werden 119 Schülerinnen und Schüler zusammengefasst. *Klasse 1* enthält demnach 58,3 % der Versuchspersonen.



**Abb. 81:** Itemprofile der latenten Klassen eines 3-Klassen-LCA-Modells für die Datensätze *Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31) aus Vortest und Nachtest.

Die Wahrscheinlichkeit, ein Item richtig zu beantworten, liegt für sieben der 13 Lernerfolgitems unter 25 %. Die Schülerinnen und Schüler verfügen nur über sehr geringes Faktenwissen und Verständnis. Lediglich die Items 20 und 22 werden von Versuchspersonen der *Klasse 1* mit einer größeren Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet als von Personen der anderen beiden Klassen. Diese beiden Items behandeln relativ einfache chemisch-physikalische bzw. geologische Konzepte (Diffusion und Verwitterung). Fragen zu ebenso einfachen systemtheoretischen Konzepten, wie sie in den Items 28 und 29 auftreten, beantworten die Schülerinnen und Schüler mit einer Wahrscheinlichkeit von über 75 % richtig. *Klasse 1* umfasst somit Versuchspersonen, die über relativ geringes themenspezifisches Wissen verfügen, einfache chemisch-physikalische, geologische und allgemeine systemtheoretische Konzepte kennen sie jedoch.

In der *Klasse 2* werden 22,1 % der Versuchspersonen zusammengefasst. Die *Klasse 2* enthält demnach 45 Schülerinnen und Schüler. Innerhalb dieser Klasse werden sechs Items mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 25 % richtig beantwortet. Die *Klasse 2* umfasst Schülerinnen und Schüler, die über relativ geringes chemisch-physikalisches Wissen verfügen, jedoch allgemeine systemtheoretische Konzepte kennen. Versuchspersonen dieser Klasse beantworten Items aus dem Bereich „Allgemeine Systemtheorie“ in der Regel mit einer größeren Wahrscheinlichkeit richtig, als Personen der anderen beiden Klassen.

In der *Klasse 3* werden 40 Schülerinnen und Schüler zusammengefasst. *Klasse 3* enthält 19,6 % der Versuchspersonen. Diese zeichnen sich durch ein relativ großes chemisch-physikalisches bzw. allgemeines systemtheoretisches Faktenwissen und Verständnis aus.

#### **12.8.1.2.3 Analyse des Lernzuwachses in der Kategorie Lernerfolg**

In Tab. 110 ist der Klassenwechsel zwischen Vor- und Nachtest für das 3-Klassen-LCA-Modell dargestellt. Von den 102 Versuchspersonen verbleiben 50 nach den Lernsitzen in der *Klasse 1*, zwölf in der *Klasse 2* und zwölf in der *Klasse 3*. 17 Schülerinnen und Schüler verbessern sich, d. h. sie steigen nach dem Treatment in eine höhere Klasse auf. Elf Versuchspersonen verschlechtern sich. Sie werden im Nachtest mit einer größeren Wahrscheinlichkeit einer niedrigeren Klasse zugeordnet. Sechs Schülerinnen und Schüler werden im Vortest am wahrscheinlichsten der *Klasse 1* und im Nachtest am wahrscheinlichsten der *Klasse 2* zugeordnet. Sie haben ihr Wissen über allgemeine systemtheoretische Aspekte verbessert. Physikalisch-chemische Konzepte verstehen sie dagegen immer noch nicht. Weitere sechs Versuchspersonen wechseln jedoch von der ersten in die dritte Klasse. Diese Personen erzielen nach dem Treatment sowohl im allgemeinen systemtheoretischen als auch im physikalisch-chemischen Bereich einen Lernzuwachs.

		Nachttest			
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
Vortest	Klasse 1	50	6	6	62
	Klasse 2	6	12	5	23
	Klasse 3	1	4	12	17
	Gesamt	57	22	23	102

**Tab. 110:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachttest (*Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31)).

Bei den insgesamt 74 Versuchspersonen, die die Klasse nach dem Treatment nicht wechseln, kann „Lernen“ anhand der Änderung der mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeit ermittelt werden (siehe Tab. 111 und Tab. 112 auf Seite 263). Zunächst werden die Versuchspersonen betrachtet, die sowohl im Vortest als auch im Nachttest der *Klasse 1* zugeordnet wurden. Die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit beträgt im Vortest 92,88 %, im Nachttest sinkt sie auf 91,36 %. Dementsprechend steigt die Summe der mittleren Wahrscheinlichkeiten der *Klasse 2* bzw. der *Klasse 3* zugeordnet zu werden.

		Vortest		
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Klassenwechsel VT/NT	N			
Klasse 1/Klasse 1	50	92,88 %	5,87 %	1,25 %
Klasse 2/Klasse 2	12	0,81 %	90,99 %	8,20 %
Klasse 3/Klasse 3	12	6,78 %	5,75 %	87,47 %

**Tab. 111:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.

		Nachttest		
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Klassenwechsel VT/NT	N			
Klasse 1/Klasse 1	50	91,36 %	6,88 %	1,76 %
Klasse 2/Klasse 2	12	1,80 %	90,37 %	7,83 %
Klasse 3/Klasse 3	12	4,54 %	2,18 %	93,28 %

**Tab. 112:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachttest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.

Für die Versuchspersonen, die sowohl im Vor- als auch im Nachtest der *Klasse 3* angehören zeigt sich eine Erhöhung von 87,47 % im Vortest auf 93,28 % im Nachtest. Die Summe der mittleren Wahrscheinlichkeiten, einer niedrigeren Klasse zugeordnet zu werden, sinkt somit.

#### 12.8.1.2.4 Einfluss systemischer Darstellungsformen

Im Folgenden wird der Einfluss systemischer Darstellungsformen beschrieben. In Tab. 113 ist der Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest für die Kategorie Lernerfolg differenziert nach der Lerngruppe bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen aufgeführt. Innerhalb der Gruppe C ges, die aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert hat, steigen 8 Schülerinnen und Schüler in eine höhere Klasse auf. 23,5 % der Versuchspersonen aus Gruppe C ges verbessern sich also. Lediglich 8,8 % belegen im Nachtest eine geringere Gruppe als im Vortest (N = 3).

			Nachtest			
			Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
<b>A ges</b>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	15	1	3	19
		Klasse 2	2	1	1	4
		Klasse 3	1	0	5	6
		Gesamt	18	2	9	29
<b>B ges</b>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	22	2	1	25
		Klasse 2	3	5	1	9
		Klasse 3	0	2	3	5
		Gesamt	25	9	5	39
<b>C ges</b>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	13	3	2	18
		Klasse 2	1	6	3	10
		Klasse 3	0	2	4	6
		Gesamt	14	11	9	34

**Tab. 113:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest (Lernzuwachs/Lernerfolg (Item 19 – 31)) differenziert nach der Lerngruppe bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen.



Der Vergleich zwischen der Anzahl von Versuchspersonen, die in eine höhere Klasse aufsteigen, und denen, die in eine niedrigere Klasse absteigen, ist bei den Lerngruppen A ges und B ges ausgewogener. Von den Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme gearbeitet haben (A ges), verbessern sich 17,2% (N = 5), 10,3 % verschlechtern sich (N = 3). Versuchspersonen, die Fluss- und Wirkungsdiagrammen passiv rezipiert haben (B ges), steigen zu 10,3 % in eine höhere Klasse auf (N = 4) und zu 12,8 % in eine niedrigere Klasse ab (N = 5).

Die Anleitung zur aktiven Konstruktion (C ges) scheint den Wechsel in eine höhere Klassen zu begünstigen und dem Wechsel in eine niedrigere Klasse entgegenzuwirken.

## 12.8.2 LCA für die Kategorie *System Erde*

### 12.8.2.1 Modellgeltung und Auswahl des Testmodells für die Analyse der Kategorie **Lernerfolg**

Es wurden zwei klassifizierende Testmodelle auf ihre Geltung überprüft, eines mit zwei latenten Klassen (2-Klassen-LCA-Modell) und eines mit drei latenten Klassen (3-Klassen-LCA-Modell). Die Modellgeltungsindices sind in Tab. 114 aufgeführt. Gemäß dem BIC- und dem CAIC-Index bildet das 2-Klassen-Modell die Daten besser ab als das 3-Klassen-Modell (Rost, 1996). Im Folgenden wird aufgrund der Itemprofile das zweitbeste klassifizierende Modell mit drei Klassen analysiert.

Modell	BIC-Index	CAIC-Index
Klassifizierendes Modell mit zwei latenten Klassen (2-Klassen-LCA-Modell)	1255,62	1282,62
Klassifizierendes Modell mit drei latenten Klassen (3-Klassen-LCA-Modell)	1288,46	1329,46

**Tab. 114:** Geltung ausgewählter LCA-Modelle.

### 12.8.2.2 3-Klassen-LCA-Modell

Obwohl gemäß der Modellgeltungsindices BIC und CAIC das 2-Klassen-Modell vorrangig auszuwählen ist, kann das 3-Klassen-Modell besser interpretiert werden. Die Analyse des Modells für drei latente Klassen ist aufgrund der Itemprofile aufschlussreicher.

### 12.8.2.2.1 Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 3-Klassen-LCA-Modells

Die geringste Wahrscheinlichkeit, einer der beiden Klassen zugeordnet zu werden, beträgt 33,3 %. In diesem Fall wäre das Antwortmuster der Versuchsperson keiner der drei Klassen eindeutig zuzuweisen. Die geringste Wahrscheinlichkeit, mit der eine Schülerin bzw. ein Schüler dieser Studie einer Klasse zugeordnet wurde, beträgt 57,05 %. 72,54 % wurden einer der drei Klassen mit einer Wahrscheinlichkeit von > 90 % zugewiesen. Die mittleren maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten (siehe Tab. 109) liegen in allen drei Fällen über 89 %. Die alternativen Zuordnungswahrscheinlichkeiten liegen stets unter 10 %. Demnach bildet das 3-Klassen-LCA-Modell die Daten zuverlässig ab.

Klasse	Erwartete Größe		Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 1	Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 2	Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 3
	N	N [%]			
1	49	48,0	89,6 %	9,7 %	0,7 %
2	41	40,2	8,8 %	89,6 %	1,7 %
3	12	11,8	3,4 %	1,9 %	94,7 %
Gesamt	102	100			

Tab. 115: Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 3-Klassen-LCA-Modells.

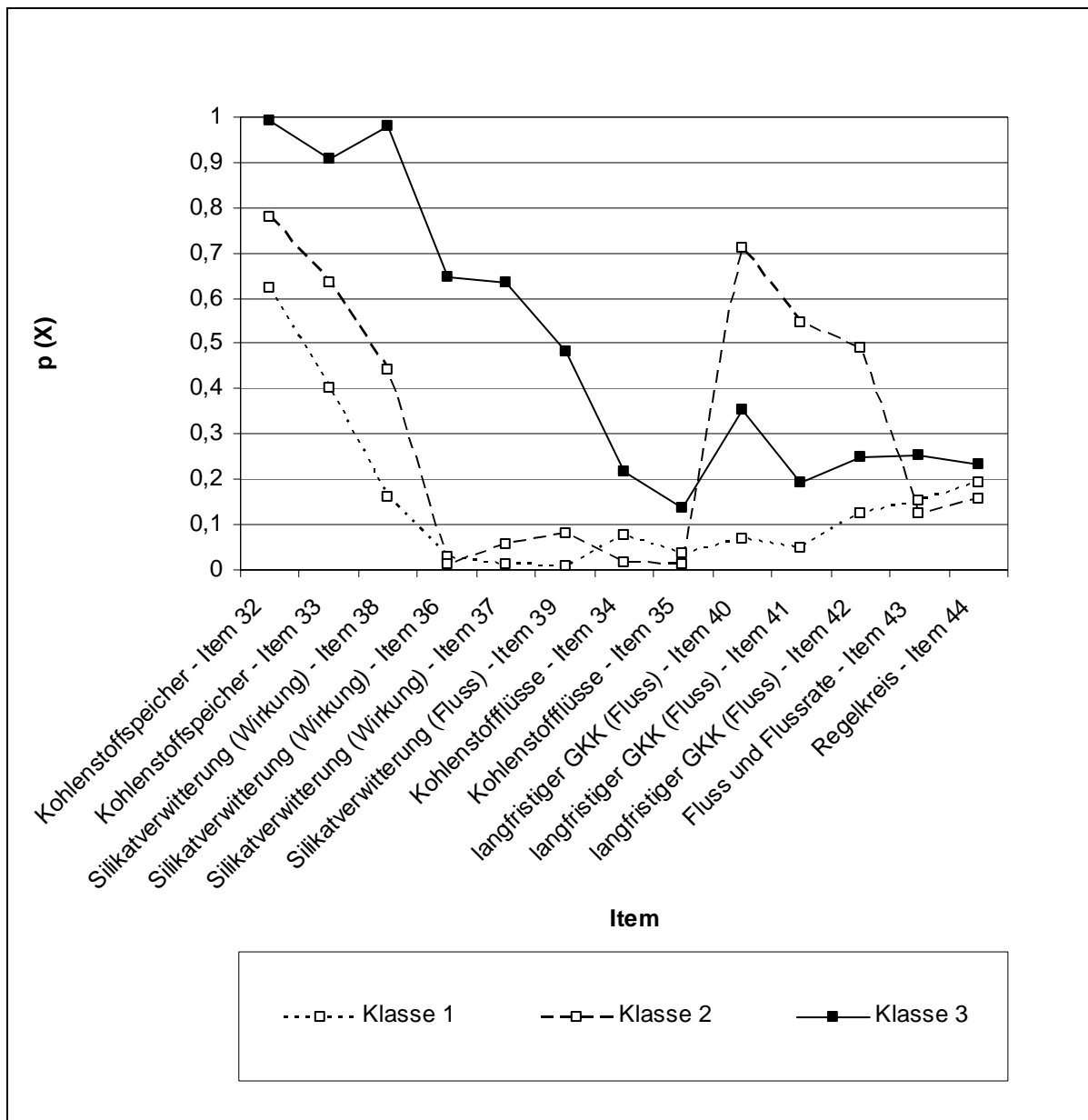
### 12.8.2.2.2 Itemprofile des 3-Klassen-LCA-Modells

In Folgenden werden die Itemprofile der drei latenten Klassen graphisch dargestellt (siehe Abb. 82 auf Seite 267) und erläutert. In der *Klasse 1* werden 49 der insgesamt 102 Versuchspersonen zusammengefasst. Die Wahrscheinlichkeit, ein Item richtig zu beantworten, liegt für elf der 13 Lernerfolgitems unter 25 %. Die Schülerinnen und Schüler verfügen nur über sehr geringes Wissen über den globalen Kohlenstoffkreislauf. Die Items 32 und 32 werden von Versuchspersonen der *Klasse 1* mit einer größeren Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet. Hierbei handelt es sich um relative einfache Fragen zu Kohlenstoffspeichern. *Klasse 1* umfasst somit Schülerinnen und Schüler, die über relativ geringes themenspezifisches Wissen verfügen.

In der *Klasse 2* werden 41 Schülerinnen und Schüler zusammengefasst. Innerhalb dieser Klasse werden sieben Items mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 25 % richtig beantwortet. Die *Klasse 2* umfasst Versuchspersonen, die über Wissen zum Thema Kohlenstoffspeicher sowie über Kohlenstoffflüsse des langfristigen Kohlenstoffkreislaufes verfügen. Wir-

kungsbeziehungen innerhalb des Systems langfristiger Kohlenstoffkreislauf am Kontext Silikatverwitterung kennen sie jedoch nicht.

In der *Klasse 3* werden 12 Schülerinnen und Schüler zusammengefasst. *Klasse 3* enthält 11,8 % der Versuchspersonen. Diese verfügen über ein relativ großes Wissen zum Thema Kohlenstoffspeicher und Wirkungsbeziehungen innerhalb langfristiger Kohlenstoffkreislaufs am Kontext Silikatverwitterung. Diese Items zeichnen sich durch einen relativ hohen Schwierigkeitsgrad aus.



**Abb. 82:** Itemprofile der latenten Klassen eines 3-Klassen-LCA-Modells für den Datensatz *Lernzuwachs/System Erde* (Item 32 – 44) aus dem Nachttest.

### 12.8.2.2.3 Einfluss systemischer Darstellungsformen

Schülerinnen und Schüler der *Klasse 1* und der *Klasse 2* verteilen sich relativ gleichmäßig auf die drei Lerngruppen zum Einsatz systemischer Darstellungsformen: A ges, B ges und C ges (siehe Tab. 116). Versuchspersonen, die der *Klasse 3* zugeordnet wurden, haben überwiegend mit fertigen Flussdiagrammen gelernt. In dieser Klasse sind die Schülerinnen und Schüler zusammengefasst, die Items mit relativ hohem Schwierigkeitsgrad beantworten konnten.

		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
Lerngruppe	A ges	14	14	1	29
	B ges	17	13	9	39
	C ges	18	14	2	34
	Gesamt	49	41	12	102

**Tab. 116:** Klassenzugehörigkeit in Abhängigkeit von der Lerngruppe bezüglich des Einflusses systemischer Darstellungsformen (*Lernzuwachs/System Erde* (Item 32 – 44)).

### 12.8.2.2.4 Einfluss mehrperspektivischen Wissens

Die Versuchspersonen der *Klasse 1* und der *Klasse 2* verteilen sich relativ gleichmäßig auf die beiden Lerngruppen uni ges und multi ges (siehe Tab. 117). Innerhalb der Klasse 3 haben 8 Schülerinnen und Schüler mit uni-perspektivischen Texten gelernt. Lediglich halb so viele haben mit multi-perspektivischen Texten gearbeitet.

		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
Lerngruppe	uni ges	26	20	8	54
	multi ges	23	21	4	48
	Gesamt	49	41	12	102

**Tab. 117:** Klassenzugehörigkeit in Abhängigkeit von der Lerngruppe bezüglich des Einflusses mehrperspektivischen Wissens (*Lernzuwachs/System Erde* (Item 32 – 44)).

### 12.8.2.2.5 Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens

Schülerinnen und Schüler der *Klasse 1* belegen vor allem die Lerngruppen B 2 (passive Rezeption von Fluss- und Wirkungsdiagrammen sowie zwei-perspektivische Texte) und C 1 (aktive Systemdiagrammkonstruktion und uni-perspektivische Texte). Innerhalb der *Klasse 2* zeigt sich eine sehr ausgewogene Verteilung. Versuchspersonen, die der Klasse 3 zugeordnet wurden, haben überwiegend mit fertigen Diagrammen gelernt.

		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
Lerngruppe	A 1	7	7	0	14
	A 2	7	7	1	15
	B 1	7	7	6	20
	B 2	10	6	3	19
	C 1	12	6	2	20
	C 2	6	8	0	14
	Gesamt	49	41	12	102

**Tab. 118:** Klassenzugehörigkeit in Abhängigkeit von der Lerngruppe bezüglich der Kombination des Einflusses systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens (*Lernzuwachs/System Erde* (Item 32 – 44)).

## 12.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studie in tabellarischer Form zusammengefasst. „+“ kennzeichnet ein hypothesenbestätigendes Ergebnis, „-“ ein hypothesenwidriges Ergebnis und „+/-“ ein teilweise hypothesenkonformes Ergebnis.

Hypothese – Einfluss systemischer Darstellungsformen		Ergebnis	
		Kategorie <i>Lernerfolg</i>	Kategorie <i>System Erde</i>
<b>1a</b>	Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.	-	-
<b>1b</b>	Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.	-	+/-
<b>1c</b>	Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die ohne Systemdiagramme arbeiten.	-	+

**Tab. 119:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss systemischer Darstellungsformen. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis.

<b>Hypothese – Einfluss mehrperspektivischen Wissens</b>		<b>Ergebnis</b>	
		Kategorie <i>Lernerfolg</i>	Kategorie <i>System Erde</i>
<b>2</b>	Schülerinnen und Schüler, die zwei-perspektivisches Lernmaterial zum System Kohlenstoffkreislauf nutzen (z. B. Klimageschichte und Rohstoffnutzung), verbessern ihr Wissen über dieses Konzept stärker als Schülerinnen und Schüler, die ein-perspektivisches Lernmaterial nutzen.	–	–

**Tab. 120:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss mehrperspektivischen Wissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis.

<b>Hypothese – Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens</b>		<b>Ergebnis</b>	
		Kategorie <i>Lernerfolg</i>	Kategorie <i>System Erde</i>
<b>3a</b>	Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.	–	–
<b>3b</b>	Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.	–	+

**Tab. 121:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis.

Hypothese – Einfluss des Vorwissens		Ergebnis	
		Kategorie Lernerfolg	Kategorie System Erde
<b>4a</b>	Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.	+/-	+/-
<b>4b</b>	Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren.	-	-
<b>4c</b>	Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker, wenn sie fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen.	-	+
<b>4d</b>	Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker, wenn sie zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.	-	-
<b>4e</b>	Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker, wenn sie einperspektivisches Lernmaterial nutzen.	-	-
<b>4f</b>	Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.	-	+/-
<b>4g</b>	Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten.	-	+/-

**Tab. 122:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss des Vorwissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis.



Hypothese – Einfluss der Lernpräferenz		Ergebnis	
		Kategorie Lernerfolg	Kategorie System Erde
5a	Visualisierer profitieren stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen als Verbalisierer.	-	+
5b	Verbalisierer lernen ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut wie mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen.	0	0

**Tab. 123:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Lernpräferenz. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis; „0“ – die Hypothese kann weder bestätigt noch abgelehnt werden.

Hypothese – Kognitive Belastung		Ergebnis		
		A ges, B ges und C ges	uni ges und multi ges	A 1, A 2, B 1, B 2, C 1, C 2
6a	Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad sind geringer kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad.	+	+	+
6b	Bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen wirkt sich die Gestaltung der Lernumgebungen (Einsatz von Systemdiagrammen: ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion; Anzahl inhaltlicher Perspektiven: uni-perspektivisch vs. zwei-perspektivisch) nicht auf die kognitive Belastung aus.	0	0	0
6c	Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sind stärker kognitiv belastet, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen.	-	-	-

**Tab. 124:** Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zur kognitiven Belastung. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis; „0“ – die Hypothese kann weder bestätigt noch abgelehnt werden.

## 13 Diskussion

Der globale Kohlenstoffkreislauf ist ein komplexer biogeochemischer Stoffkreislauf. Seine Erforschung setzt eine interdisziplinäre und systemtheoretische Betrachtung der Erde voraus. Stoffkreisläufe sind Modelle zur Illustration des Zusammenwirkens unterschiedlicher Teilsysteme des *Systems Erde*. Die Interaktionen zwischen Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre werden durch die für den Stoffumsatz relevanten Prozesse gekennzeichnet. Ihre Analyse basiert auf qualitativen und quantitativen Modellierungen. Im schulischen Unterricht wird der globale Kohlenstoffkreislauf zumeist im Kontext von Photosynthese und Atmung behandelt. Dabei werden häufig nur terrestrische Ökosysteme betrachtet. Aus den theoretischen Überlegungen ergibt sich die biologiedidaktische Frage, wie komplexe biogeochemische Themen dargestellt werden können, um den Lernprozess der Schülerinnen und Schüler zu fördern.

Als externe graphische Repräsentationen biogeochemischer Stoffkreisläufe dienen vor allem systemische Darstellungsformen. Insbesondere Stofffluss- und Wirkungsdiagramme fördern ein tieferes Struktur- und Prozessverständnis des Systems. Sollen komplexe biogeochemische Konzepte wie der globale Kohlenstoffkreislauf erlernt werden, bietet sich der Einsatz einer computergestützten Lernumgebung mit Hypertextdesign an. Hypertexte lassen Perspektivenwechsel und Kontextvariationen zu. Bei den Lernenden werden multiple Wissensrepräsentationen erreicht, die zu einer flexibleren Wissensanwendung führen. Zudem unterstützt die computergestützte Lernumgebung die aktive Konstruktion systemischer Darstellungsformen. Durch integrierte Zeichenflächen können Stofffluss- und Wirkungsdiagramme beliebig verändert werden. Innerhalb dieser Studie wurden daher die Form des Einsatzes von Stofffluss- und Wirkungsdiagramme und der induzierte Wechsel multipler inhaltlicher Perspektiven untersucht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der empirischen Untersuchung zusammenfassend diskutiert. Es werden das Lernen ohne Systemdiagramme, das Lernen mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen und das Lernen mit eigenständigen Fluss- und Wirkungsdiagrammkonstruktionen paarweise verglichen. Zudem wird die Nutzung von einperspektivischem Material der von zwei-perspektivischem Material gegenübergestellt. Bei der Analyse werden unterschiedliche Lernvoraussetzungen, das themenspezifischen Vorwissen und die Lernpräferenz mit einbezogen. Trotz des Einsatzes systemischer Darstellungsformen und des induzierten Wechsels zweier inhaltlicher Perspektiven ist versucht worden, die lernumgebungsbezogene kognitive Belastung gering zu halten. In der Diskussion werden daher abschließend der Einfluss des Vorwissens und der Einfluss der Lernumgebung auf die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung berücksichtigt.

### 13.1 Einfluss systemischer Darstellungsformen

In Kapitel 12.2 auf Seite 168 ff. wird der Einfluss systemischer Darstellungsformen beschrieben. Das Lernen ohne Systemdiagramme, das Lernen mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen und das Lernen mit eigenständigen Fluss- und Wirkungsdiagrammkonstruktionen werden paarweise verglichen. Es wird angenommen, dass die aktive Konstruktion von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen der passiven Rezeption dieser Systemdiagramme überlegen ist (*Hypothese 1a*). Zudem wird davon ausgegangen, dass das Lernen mit systemischen Darstellungsformen, sei es durch aktive Konstruktion (*Hypothese 1b*) oder durch passive Rezeption (*Hypothese 1c*), vorteilhafter ist als das Lernen ohne systemische Darstellungsformen.

Bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* können die formulierten *Hypothesen 1a, 1b* und *1c* nicht bestätigt werden, d. h. die drei Lerngruppen A ges (ohne Systemdiagramme), B ges (mit Systemdiagrammen – passive Rezeption) und C ges (mit Systemdiagrammen – aktive Konstruktion) unterscheiden sich paarweise nicht signifikant. Diese Ergebnisse können wie folgt erklärt werden:

Lernerfolgitems erfassen in dieser Arbeit vor allem grundlegendes Wissen aus den Bereichen Chemie bzw. physikalische Chemie und allgemeine Systemtheorie. Fragen, die sich direkt auf die in den Lernsituationen vermittelten Inhalte zum System *Globaler Kohlenstoffkreislauf* beziehen, werden hier nicht berücksichtigt. Zum Beispiel bezieht sich ein in dieser Studie verwendetes Lernerfolgitem auf das Verständnis des Konzeptes *chemisches Gleichgewicht*. In der dazugehörigen Lernsituation sollten die Versuchspersonen das System der physikalischen Kohlenstoffpumpe analysieren. Zentrale Aspekte sind Kohlenstofftransporte innerhalb des Ozeans (Stoffflüsse) und deren Beeinflussung. (Wirkungsbeziehungen). Das Konzept *chemisches Gleichgewicht* unterstützt lediglich das Verständnis spezifischer Kohlenstoffflüsse. Der Zuwachs dieses so genannten Begleitwissens konnte durch das Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen, sei es in Form passiver Rezeption oder durch aktive Konstruktion, nicht positiv beeinflusst werden. Die Studien von Klieme und Maichle (1991, 1994), Ossimitz (1994, 1996) sowie Maierhofer (2001) haben die lernprozessfördernde Wirkung insbesondere von Wirkungs- und Flussdiagrammen nachgewiesen. Die Messung der Lernzuwächse orientierte sich jedoch nicht an grundlegenden fachlichen Inhalten, wie es die Items der Kategorie *Lernerfolg* dieser Studie taten. Ossimitz und Maierhofer haben lediglich anwendungsorientierte Items eingesetzt. Items dieses Typs werden in dieser Studie unter der Kategorie *System Erde* zusammengefasst.

Bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* sind die *Hypothesen 1a* und *1b* abzulehnen; die *Hypothese 1c* kann bestätigt werden. Die Items der Kategorie *System Erde* erfassen die zentralen Aspekte der in den Lernsituationen behandelten Teilsysteme des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Struktur- und Prozesseigenschaften des anthropogenen

Einflusses auf den Kohlenstoffkreislauf, der Silikatverwitterung und der physikalischen Kohlenstoffpumpe werden in der Kategorie *System Erde* berücksichtigt. Den größten Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* erzielten Schülerinnen und Schüler, die mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen gearbeitet haben. Die passive Rezeption ist sowohl dem Lernen ohne Systemdiagramme als auch der aktiven Konstruktion von Systemdiagrammen überlegen. Somit kann der Nutzung fertiger Fluss- und Wirkungsdiagramme ein lernprozessfördernder Effekt nachgewiesen werden. Ein tendenzieller Vorteil der Konstruktionsmethode gegenüber dem Verzicht auf den Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen kann ebenfalls festgestellt werden. Diese Ergebnisse lassen sich wie folgt erklären:

Die von Ossimitz (2000) und Maierhofer (2001) erhobenen lernprozessfördernden Fortschritte beim Darstellen von Wirkungsdiagrammen nach einem kurzen Methodentraining<sup>51</sup> sind gezeigt worden. Die Schülerinnen und Schüler haben vom Einsatz fertiger Systemdiagramme am stärksten profitiert. Die aktive Konstruktion hat nicht den angenommenen Effekt erzielt. Für die vorliegende Studie kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Konstruktionsmethode mit den Schülerinnen und Schülern über einen angemessenen Zeitraum geübt wurde. Dies wird durch die Ergebnisse unterstützt, die sich bei der Berücksichtigung des Vorwissens ergeben (siehe Kapitel 13.4 auf Seite 280 f.). Der zeitliche Rahmen des Methodentrainings ist nicht zu kurz gewesen, vielmehr haben Lernenden mit geringem Vorwissen Schemata bezüglich des fachlichen Inhalts gefehlt.

In den Studien von Klieme und Maichle (1991, 1994) haben die Versuchspersonen lediglich aktiv konstruiert. In den Studien von Ossimitz (1994, 1996) hatten die unterrichtenden Lehrer große Freiräume bei der Unterrichtsgestaltung. Obwohl die aktive Konstruktion von Systemdiagrammen im Vordergrund stand, wurden häufig auch fertige Diagramme eingesetzt. In der Studie von Maierhofer (2001) gab es ein Systemdiagrammtraining, das ebenfalls beide Einsatzformen berücksichtigte. Sowohl von Ossimitz als auch von Maierhofer wurden Lerngruppen jedoch nicht nach passiver Rezeption und aktiver Konstruktion unterschieden. Stern, Aprea und Ebner (2003) haben passive Diagrammrezeption und aktive Diagrammkonstruktion vor allem an mathematischen Kontexten vergleichend untersucht. Sie haben jedoch nicht, wie in dieser Studie, Stofffluss- und Wirkungsdiagramme eingesetzt. Sie konnten zeigen, dass Diagramme als mentale Werkzeuge dienen, um einen Lernstoff zu strukturieren und ein tieferes Verständnis zu ermöglichen. Sie schreiben der aktiven graphischen Konstruktion eine bedeutendere Rolle als der passiven Rezeption zu. Ein

---

<sup>51</sup> „Wir konnten feststellen, dass bereits das bloße Sehen von zwei einfachen Wirkungsdiagrammen Schüler dazu veranlasst, [...] ganz anders in eine Graphik umzusetzen als dies Schüler ohne einen solchen Hinweis tun.“ (Ossimitz, 2000 S.133)

„Diese Vorbereitung reichte aus, dass alle drei Schüler im Vortest [...] innerhalb von wenigen Minuten die verbal gegebene [...] Situation in Wirkungsdiagrammform darstellen.“ (Ossimitz, 2000 S.161)

Diagramm zu zeichnen sei nicht nur hilfreich, um komplexe Informationen zu veranschaulichen, sondern könne auch die Struktur eines Problems enthüllen. Hagel (1985) stellt in seinen geographiedidaktischen Arbeiten den Vorteil eigenständiger Konstruktion insbesondere von Wirkungs- und Flussdiagrammen bei der Vermittlung fachlicher Inhalte heraus. Sie erleichterten das Analysieren und Strukturieren von Zusammenhängen und ließen die Komplexität und Prozessdynamik besser erkennen. Auch Bell (2000) weist auf die Bedeutung der eigenständigen Konstruktion systemischer Darstellungsformen hin. Selbstkonstruierte graphische Darstellungen bildeten eine wesentliche Brücke zwischen prozesshaftem Zugang und nachfolgender Abstraktion. Sie unterstützten die Bildung dynamischer Konzepte und die vertiefte Auseinandersetzung. Auf selbst erstellte Graphiken könne der Lernende im Folgenden besser zurückgreifen. Die eigenständige Konstruktion ermögliche häufig das Ziehen weiter reichender Schlüsse. Die lernprozessfördernde Wirkung von aktiven Diagrammkonstruktionen konnte in der vorliegenden Studie zunächst nicht bestätigt werden (vgl. Kapitel 13.4 auf Seite 280 f.). Dieses Ergebnis ist vermutlich auf die Komplexität der hier berücksichtigten naturwissenschaftlichen Lerninhalte zurückzuführen. Insbesondere Bell bezieht seine Aussage auf das Erarbeiten singulärer physikalischer Aspekte, wie etwas dem Fließgleichgewichtskonzept. In allen anderen Studien wurde der Lernzuwachs auch durch Analyse komplexer Systeme gemessen. Jedoch basierten die zu untersuchenden Systeme nicht auf so zahlreichen naturwissenschaftlichen Konzepten, wie es in dieser Studie der Fall war.

Stern, Aprea und Ebner (2003) sagen auch, dass Diagramme den Transfer von Wissen auf neue Probleme in anderen Kontexten erleichterten. Zudem rege die Nutzung von Diagrammen auch die metakognitiven Aktivitäten der Lernenden an, da sie über ihren Lernprozess nachdächten. Diese Vorteile konnten durch die Lernzuwächse der Schülerinnen und Schüler, die mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen gearbeitet haben, bestätigt werden.

## **13.2 Einfluss mehrperspektivischen Wissens**

In Kapitel 12.3 auf Seite 177 ff. wird untersucht, in wieweit zweidimensional repräsentiertes Wissen das Lernen über das System Kohlenstoffkreislauf fördert. Es wird angenommen, dass zwei-perspektivisches Lernmaterial den Lernprozess stärker als einperspektivisches unterstützt (*Hypothese 2*). Die Unterschiede bei den Lernzuwächsen in den Kategorien *Lernerfolg* und *System Erde* fallen relativ gering aus. Zwischen den Lerngruppen, die mit ein- bzw. zwei-perspektivischem Material gearbeitet haben, treten keine signifikanten Unterschiede auf. *Hypothese 2* kann nicht bestätigt werden.

In Kapitel 12.5.4 auf Seite 208 ff. wird zudem der Einfluss mehrperspektivischen Wissens unter Berücksichtigung des Vorwissens untersucht. Zwischen der Lerngruppe, die mit inhaltlich ein-perspektivischen Vertiefungstexten gelernt hat (*uni ges*), und der Gruppe, die mit inhaltlich zwei-perspektivischen Vertiefungstexten gelernt hat (*multi ges*) können sowohl für Schülerinnen und Schüler mit geringem als auch für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Die Ergebnisse beziehen sich sowohl auf die Kategorie *Lernerfolg* als auch auf die Kategorie *System Erde*.

Diese Ergebnisse können folgendermaßen erklärt werden: In den bisherigen Studien zur Wirkung multiperspektivischen Lernens hat fast stets die Struktur des Lernmaterials im Vordergrund gestanden. Das Lernen mit Hypertexten ist dem Lernen mit linearen Texten gegenübergestellt worden. Die Experimentalgruppen, die mit Hypertexten gelernt haben, haben gegenüber Kontrollgruppen, die mit linearen Texten gelernt haben, bessere Transferleistungen bei Anwendungsaufgaben erzielt (siehe Gerstenmaier & Mandel, 1995, Spiro & Jehng, 1990, Spiro, Feltovich, Jacobson et al., 1992 und Schanze, 2001). In der vorliegenden Studie nutzten alle sechs Lerngruppen computergestütztes Material im Hypertextdesign. Die inhaltliche Mehrperspektivität wurde lediglich in einem kleinen Teil der dargebotenen Informationen, in den so genannten Vertiefungstexten realisiert. Die dort enthaltenen fachlichen Inhalte sollten zur Lösung der Lernaufgaben innerhalb der Lernsitzen genutzt werden. Aufgrund der starken Vernetzung von Vertiefungstexten mit übrigen Informationen innerhalb des Lernmaterials kann die Materialstruktur den Lernprozess stärker beeinflusst haben als die inhaltliche Mehrperspektivität der Vertiefungstexte. Die Lernprotokolle, die die Reihenfolge der innerhalb der Lernsitzen besuchten Seiten und die Verweildauer auf diesen Seiten erheben, lassen auf eine zu geringe Nutzung des Vertiefungstextangebots schließen. Lediglich diese Zusatzinformationen sind ein- bzw. zwei-perspektivisch gestaltet. Die Form des Einsatzes der Vertiefungstexte muss daher bei nachfolgenden Untersuchungen überdacht werden.

### **13.3 Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens**

In Kapitel 12.4 auf Seite 183 ff. wird der Einfluss systemischer Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagramme) in Verbindung mit mehrperspektivisch repräsentiertem Wissen untersucht. Es wird angenommen, dass Schülerinnen und Schüler, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen (*Hypothese 3a*). Diese Hypothese kann sowohl für die Kategorie *Lernerfolg*, in der grundlegendes physikalisch-chemisches und allgemei-

nes systemtheoretisches Wissens vereint wird, als auch für die Kategorie *System Erde*, die direkte Fragen zum Kohlenstoffkreislauf zusammenfasst, nicht bestätigt werden. In beiden Kategorien sind die Unterschiede zwischen den betreffenden Lerngruppen (*B 2* und *C 1*) relativ gering.

Zudem wird angenommen, dass Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten (*Hypothese 3b*). Diese Hypothese muss für die Kategorie *Lernerfolg* abgelehnt werden. Für die Kategorie *System Erde* kann sie jedoch bestätigt werden. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass der relativ große mittlere Lernzuwachs bei den *System Erde*-Items innerhalb der Gruppe, die mit fertigen Diagrammen gelernt hat, den geringen mittleren Lernzuwachtsunterschied der ein- und zwei-perspektivischen Gruppen überlagert. Dies begründet sich damit, dass sich der Einsatz fertiger Fluss- und Wirkungsdiagramme auf das Lernen des Systems Kohlenstoffkreislauf positiver auswirkt, als die Verwendung zwei-perspektivischen Lernmaterials.

Der Einfluss systemischer Darstellungsformen (Fluss- und Wirkungsdiagramme) in Verbindung mit mehrperspektivisch repräsentiertem Wissen wird in Kapitel 12.5.5 auf Seite 217 ff. unter Berücksichtigung des Vorwissens untersucht. Bezüglich der Kategorie *System Erde*, die in den Lernsituationen vorkommende Konzepte zum globalen Kohlenstoffkreislauf beinhaltet, können die *Hypothesen 3a* und *3b* tendenziell bestätigt werden. Schülerinnen und Schüler mit hohem biologischem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf tendenziell stärker als Schülerinnen und Schüler, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf tendenziell stärker als Schülerinnen und Schüler, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich der Einsatz systemischer Darstellungsformen positiver auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* auswirkt, als der Einsatz zwei-perspektivischen Lernmaterials. Dieses Ergebnis zeigt sich nicht für die Kategorie *Lernerfolg*. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt erklären:

Spiro und Mitarbeiter konnten zeigen, dass Lernende, die eine Präferenz für komplexe Aufgabenstellungen haben, höhere Lernerfolge erzielen als diejenigen mit Präferenz für strukturierte Aufgabenstellungen. Versteht man unter dem Schritt von *zwei-perspektivischem Material ohne Systemdiagramme* zu *ein-perspektivischem Material mit fertigen Systemdiagrammen* sowie dem Schritt von *zwei-perspektivischem Material mit fertigen Systemdiagramm* zu *ein-perspektivischem Material mit eigenständiger Diagramm-*

*konstruktion* eine Komplexitätserhöhung, so scheinen Schülerinnen und Schüler mit hohem fachspezifischem Vorwissen die adäquate Darstellung dynamischer Prozesse besser nutzen zu können als Lernende mit geringem Vorwissen (siehe Kapitel 13.4 auf Seite 280 f.).

### 13.4 Vorwissen

In Kapitel 12.5 auf Seite 193 ff. wird der Einfluss des Vorwissens untersucht. Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen erreichen wie angenommen einen größeren mittleren Lernzuwachs als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (*Hypothese 4a*). Dies trifft sowohl für die Kategorie *Lernerfolg* als auch für die Kategorie *System Erde* zu. Die Mittelwertsunterschiede sind jedoch in beiden Kategorien relativ gering und nicht signifikant. Somit kann die *Hypothese 4a* nur tendenziell bestätigt werden.

Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen in der Kategorie *System Erde* tendenziell am stärksten, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren (*Hypothese 4b*) und am geringsten, wenn sie ohne Diagramme lernen (siehe Kapitel 12.5.3.3 auf Seite 205 ff.). Diese Ergebnisse können wie folgt erklärt werden:

Die Items zur Ermittlung des Vorwissensgrads umfassen vor allem biologische Konzepte. Demnach sind die Ergebnisse für Versuchspersonen mit hohem, insbesondere biologischem, Vorwissen hypothesenkonform bzw. tendenziell hypothesenkonform. Sie beziehen sich jedoch nur auf das Lernen in der Kategorie *System Erde*. Somit können die *Hypothesen 1a, 1b* und *1c* bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen bestätigt bzw. tendenziell bestätigt werden (vgl. Kapitel 13.1 auf Seite 275 ff.). Versuchspersonen mit hohem Vorwissen verbessern ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker, wenn sie eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren. Für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen ist der Umfang des Methodentrainings zur Konstruktion von Systemdiagrammen ausreichend gewesen. Diese weisen ebenfalls die von Ossimitz (2000) und Maierhofer (2001) ermittelten lernprozessfördernden Fortschritte beim Darstellen von Systemdiagrammen nach einem Konstruktionstraining auf.

Es wird zudem angenommen, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern, wenn sie fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme nutzen (*Hypothese 4c*). Diese Hypothese kann für Items, die zentrale Aspekte des globalen Kohlenstoffkreislaufsystems umfassen (Kategorie *System Erde*), bestätigt werden. Schülerinnen und Schüler mit geringem biologischem Vorwissen profitieren demnach beim Lernen komplexer biogeochemischer Konzepte vom Einsatz fertiger Systemdiagramme. Dieses Ergebnis kann folgendermaßen erklärt werden:



Die aktive Konstruktion der systemischen Darstellungsformen überfordert anscheinend Versuchspersonen mit geringem Vorwissen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Erhebung subjektiv wahrgenommener kognitiver Belastung unterstützt (siehe 13.6 auf Seite 283). Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen fühlen sich generell stärker kognitiv belastet als Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen. Die Gestaltung der Lernumgebung hat jedoch keinen Einfluss auf die Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung. Die höhere subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung ist vermutlich auf die in den Lernsituationen auftretenden fachlichen Inhalte zurückzuführen. Die thematisierten biogeochemischen Teilsysteme des globalen Kohlenstoffkreislaufs sind sehr komplex. Ein tieferes Verständnis der physikalischen Kohlenstoffpumpe, der Silikatverwitterung und der anthropogenen Einflüsse auf terrestrische und marine Ökosysteme kann nur erreicht werden, wenn biologische, chemische, physikalische und geologische Konzepte miteinander verknüpft werden. Im Gegensatz zu den Studien von Ossimitz (2000) und Maierhofer (2001) werden sehr unterschiedliche Systeme thematisiert, die ein größeres Abstraktionsvermögen voraussetzen. Schülerinnen und Schüler, die über hohes, insbesondere biologisches, Vorwissen verfügen, profitieren von der eigenständigen Systemdiagrammkonstruktion bei der Erarbeitung der komplexen biogeochemischen Konzepte. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen schätzen ihre kognitive Belastung nicht höher ein, wenn sie, anstelle fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme zu nutzen, eigenständig diese Diagramme konstruieren sollen. Sie verfügen jedoch über zu wenige Schemata bezüglich des Lerninhalts. Die aktive Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen wirkt sich bei diesen Schülerinnen und Schülern negativ auf die Lernleistung aus. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen profitieren deshalb stärker vom Nutzen fertiger Fluss- und Wirkungsdiagramme. Die Ergebnisse zeigen insbesondere, dass biologisches Wissen die entscheidende Grundvoraussetzung zur Ausbildung biologischer Kompetenzen, in diesem Fall der Kompetenz *Denken in Systemen*, ist (vgl. Mayer, Harms, Hammann, Bayrhuber & Kattmann, 2004).

In dieser Studie wird zudem angenommen, dass Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die zur eigenständigen Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen angeleitet werden und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern als Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen (*Hypothese 4f*). Es wird ebenfalls angenommen, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme und uni-perspektivisches Lernmaterial nutzen, ihr Wissen über das System Kohlenstoffkreislauf stärker verbessern als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die mit zwei-perspektivischem Lernmaterial jedoch ohne Systemdiagramme arbeiten (*Hypothese 4g*). Beiden Hypothesen können tendenziell bestätigt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz systemischer Darstellungsformen vermutlich einen positiveren Einfluss auf den Lernzuwachs in der Kategorie *System Erde* hat als der Einsatz zwei-perspektivischen Lernmaterials.

Aufgrund der relativ geringen Lernzuwächse in der Kategorie *Lernerfolg* können die bezüglich der Vorwissensabhängigkeit formulierten *Hypothesen 4b, 4c, 4d, 4e, 4f* und *4g* für diese Kategorie nicht bestätigt werden.

### 13.5 Lernpräferenz

In Kapitel 12.6 auf Seite 230 ff. wird der Einfluss der Lernpräferenz auf den Lernzuwachs untersucht. Es wird angenommen, dass Visualisierer stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen profitieren als Verbalisierer (*Hypothese 5a*). Zudem wird angenommen, dass Verbalisierer ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut lernen wie mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen (*Hypothese 5b*).

Eine Differenzierung von visueller und verbaler Lernpräferenz wird unter anderem bei Untersuchungen multimedialer Lernumgebungen vorgenommen (siehe Plass, Chun, Mayer & Leutner, 1998, Nerdel, 2003 und Kramer, 2005). Nach Riding und Watts (1997) ziehen Personen, die verbale interne Repräsentationen bevorzugen, verbale externe Repräsentationen beim Lernen vor. Ebenso haben Personen, die visuelle interne Repräsentationen bevorzugen, eine Vorliebe für bildhaftes Lernmaterial. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Verwendung des bevorzugten Materials den Lernprozess positiv beeinflusst. Plass, Chun, Mayer und Leutner (1998) konnten zeigen, dass Lernende beim Lesen eines fremdsprachlichen Textes von Übersetzungshilfen profitieren, die in der von ihnen jeweils vorgezogenen Kodierungsform (Text – Bild) dargeboten werden.

In der vorliegenden Studie kann ebenfalls nachgewiesen werden, dass Visualisierer stärker vom Lernen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen als Verbalisierer profitieren (*Hypothese 5a*). Dieses Ergebnis bezieht sich jedoch nur auf die Kategorie *System Erde*. Diese umfasst Items, die Konzepte zum System *Kohlenstoffkreislauf* aus den Lernsituationen beinhalten. Für die Kategorie *Lernerfolg*, die das grundlegende chemische, physikalisch-chemische und allgemeine systemtheoretische Wissen umfasst, kann die *Hypothese 5a* dagegen nicht bestätigt werden.

Wie schon in Kapitel 13.1 auf Seite 275 beschrieben sind die Lernzuwächse bei den Lernerfolgitems sehr gering. Es kann aus den Ergebnissen jedoch nicht abgeleitet werden, dass das Lernen des so genannten Begleitwissens nicht durch den Einsatz von Systemdiagrammen unterstützt wird. Vielmehr sollten grundlegende, fachliche Inhalte bei nachfolgenden Untersuchungen stärker in die Systemanalysen miteinbezogen werden.

Auch Verbalisierer profitieren vom Einsatz systemischer Darstellungsformen. Sie lernen, ohne den Einsatz von Systemdiagrammen ebenso gut wie mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen. Dieses Ergebnis bezieht sich sowohl auf die Kategorie *System Erde* als auch auf die Kategorie *Lernerfolg*. Es lässt sich dadurch erklären, dass die externe Repräsentation eines dynamischen Prozesses in Form von Wirkungs- und Flussdiagrammen bei Verbalisierern die Erzeugung interner Repräsentationen unterstützt. Solomon (1979) bezeichnet dieses Phänomen als Supplantationseffekt (vgl. Nerdel, 2003 und Kramer, 2005). Demzufolge kann der Einsatz von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen das Lernen komplexer biogeochemischer Konzepte unterstützen. Der Lernprozess von Schülerinnen und Schülern mit visueller Lernpräferenz wird positiv, der von Personen mit verbaler Lernpräferenz nicht negativ beeinflusst.

### 13.6 Kognitive Belastung

In Kapitel 12.7 auf Seite 245 ff. wird der Einfluss des Vorwissens und der Einfluss der Lernumgebung auf die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung untersucht. Es wird angenommen, dass Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissensgrad geringer kognitiv belastet sind als Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissensgrad (*Hypothese 6a*). Diese Hypothese kann für den Vergleich der Lerngruppen *A ges (ohne Diagramme)*, *B ges (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption)* und *C ges (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion)*, den Vergleich der Gruppen *uni ges (uni-perspektivisch)* und *multi ges (zwei-perspektivisch)* und für den Vergleich aller sechs Gruppen (*A 1, A 2, B 1, B 2, C 1* und *C 2*) bestätigt werden. Lernende mit hohem Vorwissensgrad sind geringer kognitiv belastet als Lernende mit geringem Vorwissensgrad. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Lernumgebung.

Zudem wird angenommen, dass sich bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen, die Gestaltung der Lernumgebungen nicht auf die kognitive Belastung auswirkt (*Hypothese 6b*). Diese Hypothese kann für den Vergleich der Lerngruppen *A ges, B ges* und *C ges*, den Vergleich der Gruppen *uni ges* und *multi ges* und für den Vergleich aller sechs Gruppen (*A 1, A 2, B 1, B 2, C 1* und *C 2*) weder bestätigt noch abgelehnt werden. Die Ergebnisse der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Fehler-Wahrscheinlichkeit liegen in einem statistischen Indifferenzbereich. Es konnte somit nicht gezeigt werden, ob sich die Gestaltung der Lernumgebung bei Lernenden mit hohem Vorwissen auf die subjektiv wahrgenommene kognitive Belastung auswirkt.

Abschließend wird angenommen, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen stärker kognitiv belastet sind, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren bzw. zwei-perspektivisches Lernmaterial nutzen (*Hypothese 6c*). Diese Hypothese kann

nicht bestätigt werden. Versuchspersonen mit geringem Vorwissen weisen im Mittel die geringste kognitive Belastung auf, wenn sie aktiv Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruieren und zwei-perspektivisches Material nutzen. Bezüglich des Einsatzes systemischer Darstellungsformen sind sie tendenziell am stärksten kognitiv belastet, wenn sie ohne Systemdiagramme lernen, und am schwächsten, wenn sie aktiv konstruieren.

Diese Ergebnisse lassen sich wie folgt erklären: Das schlechte Abschneiden der Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen ist vermutlich nicht auf eine erhöhte kognitive Belastung zurückzuführen. Vielmehr scheint das fehlende biologische Vorwissen den Lernprozess zu hemmen. Diese Vermutung unterstützt die Meinung von Mayer, Harms, Hammann, Bayrhuber und Kattmann (2004), dass biologisches Wissen die entscheidende Grundvoraussetzung zur Ausbildung biologischer Kompetenzen, in diesem Fall der Kompetenz *Denken in Systemen*, ist. Die lernprozessfördernde Wirkung des Einsatzes von Fluss- und Wirkungsdiagrammen, wie sie auch schon von Klieme und Maichle (1991, 1994), Ossimitz (1994, 1996) und Maierhofer (2001) gezeigt wurde, wird bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen nicht durch eine etwaige kognitive Belastung gedämpft.

## 14 Ausblick

In dieser Studie ist die Wirkung systemischer Darstellungsformen und multiperspektivischer Wissensrepräsentationen auf das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs untersucht worden. Das eingesetzte computergestützte Lernmaterial stellt das biogeochemische System Kohlenstoffkreislauf in seiner Komplexität dar. Durch den Einsatz von Stofffluss- und Wirkungsdiagrammen sowie zwei-perspektivischen Vertiefungstexten ist versucht worden, den Lernprozess zu fördern. Es sind zwei Formen des Einsatzes von Systemdiagrammen gewählt worden, die aktive Konstruktion und die passive Rezeption.

Die Ergebnisse der Studie machen deutlich, dass Stofffluss- und Wirkungsdiagramme ein tieferes Verständnis des komplexen biogeochemischen Systems Kohlenstoffkreislauf fördern. Dieser Lernprozess wird vom Vorwissen beeinflusst. Es ist gezeigt worden, dass Schülerinnen und Schüler mit geringem biologischem Vorwissen vor allem vom Einsatz fertiger Systemdiagramme profitieren. Bei Versuchspersonen mit hohem biologischem Vorwissen fördert in erster Linie die eigenständige Konstruktion von Fluss- und Wirkungsdiagrammen den Verständniserwerb. Das Vorwissen stellt somit die Basis für den lernförderlichen Effekt der aktiven Diagrammkonstruktion gegenüber der passiven Rezeption dar. In folgenden Studien sollte untersucht werden, wie die Lernumgebung gestaltet werden muss, um Vorwissensdefizite auszugleichen.

Die in dieser Studie thematisierten Stofffluss- und Wirkungsdiagramme beziehen sich auf zentrale Aspekte des komplexen biogeochemischen Systems Kohlenstoffkreislauf. Es sind die physikalische Kohlenstoffpumpe, die Silikatverwitterung und der anthropogene Einfluss auf terrestrische und marine Systeme behandelt worden. Das Verständnis dieser Konzepte kann wie beschrieben durch den Einsatz von Systemdiagrammen gefördert werden. Ein tieferes Verständnis grundlegender chemischer bzw. physikalisch-chemischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte ist von den Schülerinnen und Schülern durch das Methodentraining nicht erworben worden. Lediglich Versuchspersonen mit hohem Vorwissen in den Bereichen Chemie, Physikalische Chemie und Systemtheorie erwerben neben den zentralen Konzepten auch so genanntes Begleitwissen. Es stellt sich daher die Frage, wie Diagramme präsentiert werden müssen bzw. wie die Anleitung der Diagrammkonstruktion gestaltet werden muss, damit neben den zentralen Konzepten des komplexen biogeochemischen Systems auch grundlegende biologische, chemische, physikalische und systemtheoretische Konzepte erworben werden. In diesem Zusammenhang können die von der Software aufgezeichneten Lernprotokolle der Schülerinnen und Schüler, die unter anderem den Konstruktionsprozess der Fluss- und Wirkungsdiagramme beinhalten, helfen.

Lernsoftware zur aktiven Diagrammkonstruktion sollte verstärkt im schulischen Kontext verwendet werden. Die Möglichkeiten der Diagrammgestaltung könnten bei folgenden Programmentwicklungen weiter spezifiziert werden.

Der lernprozessfördernde Effekt zwei-perspektivischen Wissens wird in dieser Studie nicht nachgewiesen. Die Vertiefungstexte, in denen das Treatment multiperspektivischer Wissensrepräsentationen realisiert ist, sind anscheinend nicht ausreichend von den Versuchspersonen genutzt worden. Die Hinweise auf die zu verwendenden ein- bzw. zwei-perspektivischen Zusatzinformationen und deren Gestaltung müssen in folgenden Studien überdacht werden.

**Teil IV**  
**Anhang**

# Anhang A      Lernsoftware

Die Lernsoftware ist auf Anfrage bei der Autorin erhältlich.

hildebrandtkristin@gmx.de (Stand: Juli 2006)

In Folgenden wird die Inhaltsübersicht der Lernsoftware (siehe Anhang A.1) dargestellt. Zudem werden die Aufgaben, die innerhalb der Lernsitzen von den Versuchspersonen bearbeitet wurden, inklusive ihrer Lösungen (siehe Anhang A.2) präsentiert. In Anhang A.3 werden die Begleitbögen mit der Bedienungsanleitung, die den Einstieg in die Nutzung der Lernsoftware erleichtern soll, vorgestellt.

## A.1 Inhaltsübersicht der Lernsoftware

### (1) Das Systemkonzept

- (1.1) Was ist ein System?
  - (1.1.1) Zustand eines Systems
  - (1.1.2) Entwicklung eines Systems
    - (1.1.2.1) Flüsse und Flussraten
  - (1.1.3) Systemeigenschaften
    - (1.1.3.1) Systemhierarchie
    - (1.1.3.2) Einfach – komplex
    - (1.1.3.3) Statisch – dynamisch
    - (1.1.3.4) Abgeschlossen – geschlossen – offen
    - (1.1.3.5) Deterministisch – stochastisch
    - (1.1.3.6) Stabil – instabil
    - (1.1.3.7) Selbstorganisation
  - (1.1.4) Systemanalyse
  - (1.1.5) Modellbildung
- (1.2) Wie kann man Systeme darstellen?
  - (1.2.1) Verbale Darstellungen
  - (1.2.2) Graphische Darstellungen
    - (1.2.2.1) Wirkungsdiagramme
    - (1.2.2.2) Flussdiagramme
  - (1.2.3) Mathematische Darstellungen
- (1.3) Die Erde als System
  - (1.3.1) Stoffkreisläufe
    - (1.3.1.1) Stoffspeicher
    - (1.3.1.2) Stoffflüsse
    - (1.3.1.3) Biogeochemische Stoffkreisläufe
  - (1.3.2) Kreisprozesse
    - (1.3.2.1) Regelkreis
    - (1.3.2.2) Konkurrenzkreis
    - (1.3.2.3) Aufschaukelungskreis



- (2) **Kohlenstoff im System Erde**
- (3) **Kohlenstoffspeicher**
  - (3.1) Kohlenstoff in der Atmosphäre
  - (3.2) Kohlenstoff in der Biosphäre
  - (3.3) Kohlenstoff in der Hydrosphäre
  - (3.4) Kohlenstoff in der Lithosphäre
  - (3.5) Kohlenstoff in der Pedosphäre
- (4) **Kohlenstoffflüsse**
  - (4.1) Flüsse zwischen Atmosphäre und Biosphäre
  - (4.2) Flüsse zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre
  - (4.3) Flüsse zwischen Atmosphäre und Lithosphäre
  - (4.4) Flüsse zwischen Atmosphäre und Pedosphäre
  - (4.5) Flüsse zwischen Biosphäre und Hydrosphäre
  - (4.6) Flüsse zwischen Biosphäre und Lithosphäre
  - (4.7) Flüsse zwischen Biosphäre und Pedosphäre
  - (4.8) Flüsse zwischen Hydrosphäre und Lithosphäre
  - (4.9) Flüsse zwischen Hydrosphäre und Pedosphäre
  - (4.10) Flüsse zwischen Lithosphäre und Pedosphäre
- (5) **Entwicklung des Systems Erde**
  - (5.1) Entwicklung der Kohlenstoffspeicher in der Erdgeschichte
    - (5.1.1) Entwicklung der Atmosphäre
    - (5.1.2) Entwicklung der Biosphäre
    - (5.1.3) Entwicklung der Hydrosphäre
    - (5.1.4) Entwicklung der Lithosphäre
    - (5.1.5) Entwicklung der Pedosphäre
  - (5.2) Entwicklung der Kohlenstoffflüsse in der Erdgeschichte
- (6) **Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen**
  - (6.1) Diffusion
    - (6.1.1) Diffusion zwischen Gas und Flüssigkeit
  - (6.2) Lösungsprozess
    - (6.2.1) Lösungsprozess von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in Wasser
      - (6.2.1.1) Temperaturabhängigkeit
      - (6.2.1.2) Druckabhängigkeit
      - (6.2.1.3) pH-Wert-Abhängigkeit
      - (6.2.1.4) Salzgehaltabhängigkeit
    - (6.2.2) Lösungsprozess von Carbonaten
  - (6.3) Fotosynthese
    - (6.3.1) Lichtabhängigkeit
    - (6.3.2) Temperaturabhängigkeit
    - (6.3.3) CO<sub>2</sub>-Abhängigkeit
    - (6.3.4) Wasserabhängigkeit

- (6.4) Atmung
- (6.5) Verwitterung
  - (6.5.1) Physikalische Verwitterung
    - (6.5.1.1) Frostverwitterung
    - (6.5.1.2) Temperaturverwitterung
    - (6.5.1.3) Salzverwitterung
  - (6.5.2) Chemische Verwitterung
    - (6.5.2.1) Hydratationsverwitterung
    - (6.5.2.2) Verwitterung durch Hydrolyse
    - (6.5.2.3) Oxidationsverwitterung
  - (6.5.3) Biologische Verwitterung
- (6.6) Gesteinsmetamorphose
- (6.7) Vulkanismus
- (6.8) Verbrennung
- (6.9) Mineralisierung
- (6.10) Ausfällung
  - (6.10.1) Ausfällung von Carbonaten
- (6.11) Sedimentation
  - (6.11.1) Chemische Sedimente
  - (6.11.2) Biogene Sedimente
- (6.12) Diagenese
- (6.13) Biogene Carbonatbildung
- (6.14) Ausgasung

**(7) Kohlenstoffkreislauf**

- (7.1) Terrestrischer Kohlenstoffkreislauf
  - (7.1.1) Kohlebildung
- (7.2) Kohlenstoffkreislauf im Ozean
  - (7.2.1) Strömungssysteme
    - (7.2.1.1) Dichte des Wassers
    - (7.2.1.2) Thermohaline Schichtung
    - (7.2.1.3) Thermohaline Zirkulation
    - (7.2.1.4) Das große marine Förderband
    - (7.2.1.5) Auftriebsgebiete
  - (7.2.2) Leben im Ozean
    - (7.2.2.1) Phytoplankton
    - (7.2.2.2) Zooplankton
  - (7.2.3) Carbonatsystem
    - (7.2.3.1) pH-Wert-Abhängigkeit
    - (7.2.3.2) Carbonatkompensationstiefe
  - (7.2.4) Physikalische Kohlenstoffpumpe
    - (7.2.4.1) Effektivität der physikalischen Kohlenstoffpumpe
  - (7.2.5) Biologische Kohlenstoffpumpe
    - (7.2.5.1) Effektivität der biologischen Kohlenstoffpumpe
    - (7.2.5.2) Wo und wann ist die biologische Kohlenstoffpumpe wirksam?

- (7.2.6) Lagerstättenbildung im Meer
  - (7.2.6.1) Erdölbildung
  - (7.2.6.2) Kalksteinbildung
- (7.2 EXTRA<sub>A1, B1, C1, A2, B2, C2</sub>) Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima
- (7.2 EXTRA<sub>A1, B1, C1</sub>) Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit
- (7.2 EXTRA<sub>A2, B2, C2</sub>) Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport
- (7.3) Kurzfristiger Kohlenstoffkreislauf
- (7.4) Langfristiger Kohlenstoffkreislauf
  - (7.4 EXTRA<sub>A1, B1, C1, A2, B2, C2</sub>) Silikatverwitterung
  - (7.4 EXTRA<sub>A1, B1, C1</sub>) Chemische Verwitterung und tropisches Klima
  - (7.4 EXTRA<sub>A2, B2, C2</sub>) Silikatverwitterung und Kalksteinbildung
- (7.5) Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf
  - (7.5.1) Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffspeicher Ozean
  - (7.5.2) Anthropogener Einfluss auf terrestrische Kohlenstoffspeicher
  - (7.5 EXTRA<sub>A1, B1, C1, A2, B2, C2</sub>) Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem
  - (7.5 EXTRA<sub>A1, B1, C1</sub>) Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf
  - (7.5 EXTRA<sub>A2, B2, C2</sub>) Produktion von Zement

## A.2 Aufgaben innerhalb der Lernsitungen

Im Folgenden werden die Aufgaben, die von den Schülerinnen und Schülern innerhalb der drei Lernsitungen bearbeitet wurden, dargestellt. Blau und unterstrichen gesetzte Begriffe sind so genannte Links. Blau und kursiv gesetzte Begriffe sind Glossarbegriffe. Beim Anklicken wird der entsprechende Inhalt direkt angezeigt. Fett gesetzte Begriffe stehen für Zeichenfunktionen. Bildsymbole innerhalb des Textes stehen für Buttons, die auf bestimmte Systemdiagramme verweisen. Rot gesetzte Zusätze sind nicht in der Lernsoftware enthalten. Sie geben lediglich an, welche der angegebenen Funktionen in einer Lernumgebung enthalten ist.

### A.2.1 Aufgaben innerhalb der ersten Lernsitung

#### A.2.1.1 Lernumgebungen A 1 und A 2

Zurzeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Die Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?

Bearbeiten Sie folgende Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über den anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf](#). Erarbeiten Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (1.1) Identifizieren Sie zunächst die dargestellten Kohlenstoffspeicher und beschreiben Sie diese kurz.
  - (1.2) Identifizieren Sie die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern. Nennen Sie zunächst die präsentierten Flussraten, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Identifizieren Sie dann die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt „[Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf](#)“ auch den gesamten Abschnitt „[Kohlenstoffflüsse](#)“.
  - (1.3) Wie viel des jährlich durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs verbleibt in der Atmosphäre?
  - (1.4) Wirken der Ozean und die terrestrische Biosphäre in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke?

- (2) Welche Folgen kann die beobachtete Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre auf die Entwicklung der im Abschnitt „[Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf](#)“ beschriebenen Kohlenstoffflüsse haben? Verwenden Sie für die Beantwortung dieser Frage die folgenden Abschnitte: [Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem](#), [Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf \(A 1\)](#) oder [Produktion von Zement \(A 2\)](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Durch den Einfluss des Menschen werden in erster Linie die vier Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Ozean“, „terrestrische Biosphäre“ und „Lithosphäre“ verändert. Kohlenstoff kommt in der Atmosphäre vor allem in Form von Kohlenstoffdioxid, im Ozean vor allem in Form von anorganisch gelöstem Kohlenstoff, in der terrestrischen Biosphäre in Form von organischen Verbindungen und in der Lithosphäre vor allem in Form von Carbonaten und schwer abbaubaren organischen Verbindungen vor.
- (1.2) Durch die Nutzung von Erdöl, Erdgas oder Kohle (Industrie, Verkehr, elektrische Geräte) wird in der Lithosphäre gebundener Kohlenstoff vor allem in Form von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) an die Atmosphäre abgegeben. Bei der Zementherstellung wird CO<sub>2</sub> aus Carbonaten freigesetzt. Dadurch werden insgesamt 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich freigesetzt. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.

Die Freisetzung von Kohlenstoff aus der Lithosphäre wird durch die Prozesse Verbrennung und Gesteinsmetamorphose bestimmt. Letztere kennzeichnet die Zementproduktion, bei der man die Umwandlungsreaktionen von Carbonatmineralen aufgrund hoher Temperatur nutzt.

Die Photosynthese kennzeichnet die Kohlenstoffdioxidaufnahme der Landbiomasse. Gründe für die vermehrte Aufnahmefähigkeit können auf eine Erhöhung der Photosyntheserate bei Zunahme der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration oder eine veränderte Landnutzung (z. B. Aufforstungen) sein.

Die Diffusion beziehungsweise der Lösungsprozess von Kohlenstoffdioxid kennzeichnet den Kohlenstofffluss zwischen der Atmosphäre und dem Ozean.


- (1.3) Pro Jahr reichern sich etwa 3,2 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs in der Atmosphäre an.

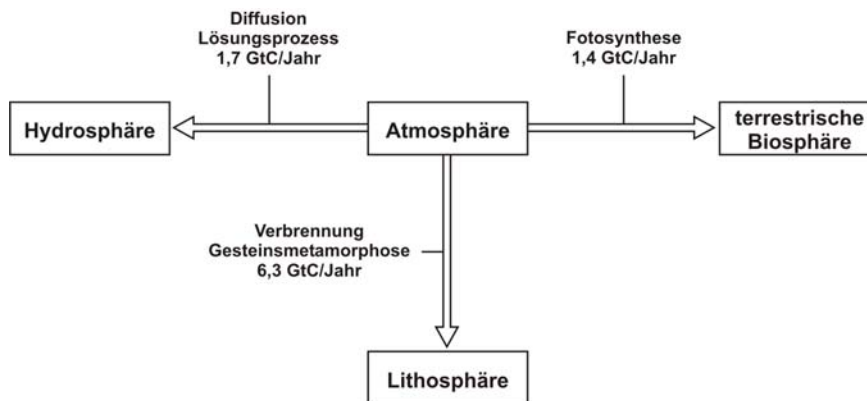
- (1.4) Die Kohlenstoffspeicher „Ozean“ und „terrestrische Biosphäre“ wirken zur Zeit in Bezug auf den Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“ als Kohlenstoffquelle. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.
- (2) Die Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre kann bei einigen Pflanzenarten die Fotosyntheseleistung verbessern. Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt wird sich vermutlich vor allem in den höheren Breiten auswirken. In anderen Regionen kann es jedoch durch Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderung zu einer Verringerung der Fotosyntheseleistung kommen. Vermutlich werden die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit der terrestrischen Biosphäre kennzeichnen, in Zukunft abnehmen. Auch die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit des Ozeans kennzeichnen, werden in Zukunft vermutlich geringer sein.

### A.2.1.2. Lernumgebungen B 1 und B 2

Zurzeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Der Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über den anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf](#). Die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse sind hier in einem [Flussdiagramm](#) dargestellt .



Die Pfeile stehen für Stoffflüsse. Sie zeigen in Richtung des Stoffflusses. Die Beschriftung der Flusspfeile zeigt die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen, und die Flussraten. Untersuchen Sie das Flussdiagramm. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

- (1.1) Identifizieren Sie zunächst die in diesem Flussdiagramm dargestellten Kohlenstoffspeicher und beschreiben Sie diese kurz.
- (1.2) Gehen Sie dann auf die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern ein. Nennen Sie zunächst die Flussraten, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen. Beschreiben Sie dann die Prozesse, die diese Kohlenstoffflüsse bestimmen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt [„Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf“](#) auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#).
- (1.3) Wie viel des jährlich durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs verbleibt in der Atmosphäre?

- (1.4) Wirken der Ozean und die terrestrische Biosphäre in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsенke?
- (2) Welche Folgen kann die beobachtete Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre auf die Entwicklung der im Abschnitt [„Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf“](#) beschriebenen Kohlenstoffflüsse haben? Verwenden Sie für die Beantwortung dieser Frage die folgenden Abschnitte: [Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem](#), [Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf \(B 1\)](#) oder [Produktion von Zement \(B 2\)](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Durch den Einfluss des Menschen werden in erster Linie die vier Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Ozean“, „terrestrische Biosphäre“ und „Lithosphäre“ verändert. Kohlenstoff kommt in der Atmosphäre vor allem in Form von Kohlenstoffdioxid, im Ozean vor allem in Form von anorganisch gelöstem Kohlenstoff, in der terrestrischen Biosphäre in Form von organischen Verbindungen und in der Lithosphäre vor allem in Form von Carbonaten und schwer abbaubaren organischen Verbindungen vor.
- (1.2) Durch die Nutzung von Erdöl, Erdgas oder Kohle (Industrie, Verkehr, elektrische Geräte) wird in der Lithosphäre gebundener Kohlenstoff vor allem in Form von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) an die Atmosphäre abgegeben. Bei der Zementherstellung wird CO<sub>2</sub> aus Carbonaten freigesetzt. Dadurch werden insgesamt 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich freigesetzt. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.

Die Freisetzung von Kohlenstoff aus der Lithosphäre wird durch die Prozesse Verbrennung und Gesteinsmetamorphose bestimmt. Letztere kennzeichnet die Zementproduktion, bei der man die Umwandlungsreaktionen von Carbonatmineralen aufgrund hoher Temperatur nutzt.

Die Photosynthese kennzeichnet die Kohlenstoffdioxidaufnahme der Landbiomasse. Gründe für die vermehrte Aufnahmefähigkeit können auf eine Erhöhung der Photosyntheserate bei Zunahme der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration oder eine veränderte Landnutzung (z. B. Aufforstungen) sein.

Die Diffusion beziehungsweise der Lösungsprozess von Kohlenstoffdioxid kennzeichnet den Kohlenstofffluss zwischen der Atmosphäre und dem Ozean.



- (1.3) Pro Jahr reichern sich etwa 3,2 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs in der Atmosphäre an.
- (1.4) Die Kohlenstoffspeicher „Ozean“ und „terrestrische Biosphäre“ wirken zurzeit in Bezug auf den Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“ als Kohlenstoffquelle. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.
- (2) Die Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre kann bei einigen Pflanzenarten die Fotosyntheseleistung verbessern. Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt wird sich vermutlich vor allem in den höheren Breiten auswirken. In anderen Regionen kann es jedoch durch Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderung zu einer Verringerung der Fotosyntheseleistung kommen. Vermutlich werden die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit der terrestrischen Biosphäre kennzeichnen, in Zukunft abnehmen. Auch die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit des Ozeans kennzeichnen, werden in Zukunft vermutlich geringer sein.

### A.2.1.3. Lernumgebungen C 1 und C 2

Zurzeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Der Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Nutzen Sie für Ihre Antworten die Graphikfläche und die Textfläche auf der rechten Seite.

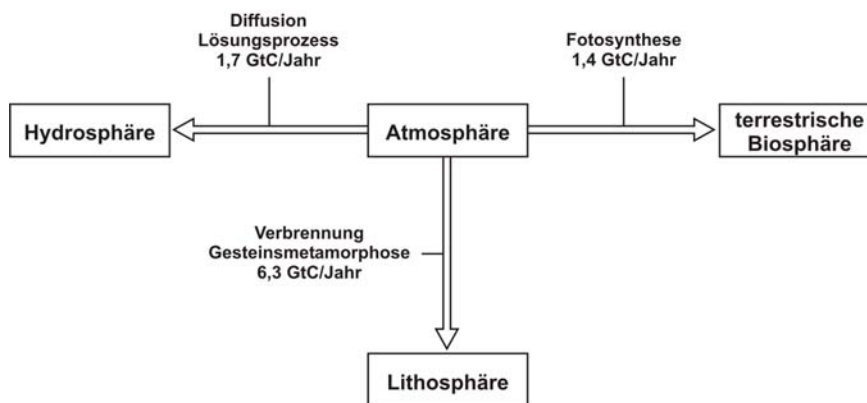
- (1) Informieren Sie sich zunächst über den anthropogenen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf](#). Stellen Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse in einem [Flussdiagramm](#) dar. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (1.1) Identifizieren Sie zunächst die dargestellten Kohlenstoffspeicher und fügen sie diese über die Funktion **Textfeld** in die Graphikfläche ein.  
(Sie können die Systemelemente verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)
  - (1.2) Identifizieren Sie die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern und fügen Sie diese über die Funktion **1. Pfeil** in die Graphikfläche ein. Die Pfeile zeigen dabei in Richtung des Stoffflusses.  
(Sie können die Pfeile verschieben und drehen sowie deren Länge ändern und sie auch wieder entfernen.)
  - (1.3) Nun sollen die Stoffflusspfeile beschriftet werden. Identifizieren Sie zunächst die präsentierten Flussraten, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Tragen Sie diese in die Graphikfläche ein. Verwenden Sie dafür die Funktion **Pfeilbeschriftung** und platzieren Sie die Pfeilbeschriftung an den Flusspfeilen. Identifizieren Sie dann die Prozesse, die diese Kohlenstoffflüsse bestimmen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt [„Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf“](#) auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#). Tragen Sie die dort herausgearbeiteten Prozesse in die bereits erstellten Textfelder an den Flusspfeilen mit ein.  
(Sie können die Pfeilbeschriftungen verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)
  - (1.4) Wie viel, des jährlich durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs verbleibt in der Atmosphäre?
  - (1.5) Wirken der Ozean und die terrestrische Biosphäre in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke?

- (2) Welche Folgen kann die beobachtete Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre auf die Entwicklung der im Abschnitt [„Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf“](#) beschriebenen Kohlenstoffflüsse haben? Verwenden Sie für die Beantwortung dieser Frage die folgenden Abschnitte: [Kohlenstoffkreislauf und Klimasystem](#), [Wälder im globalen Kohlenstoffkreislauf \(C 1\)](#) oder [Produktion von Zement \(C 2\)](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1) Ein Flussdiagramm wird in der Abbildung „Lösungsdiagramm“ dargestellt.



- (1.4) Pro Jahr reichern sich etwa 3,2 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität aus fossilen Rohstoffen freigesetzten Kohlenstoffs in der Atmosphäre an.
- (1.5) Die Kohlenstoffspeicher „Ozean“ und „terrestrische Biosphäre“ wirken zurzeit in Bezug auf den Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“ als Kohlenstoffquelle. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.
- (2) Die Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre kann bei einigen Pflanzenarten die Fotosyntheseleistung verbessern. Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt wird sich vermutlich vor allem in den höheren Breiten auswirken. In anderen Regionen kann es jedoch durch Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderung zu einer Verringerung der Fotosyntheseleistung kommen. Vermutlich werden die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit der terrestrischen Biosphäre kennzeichnen, in Zukunft abnehmen. Auch die Flussraten, die die Kohlenstoffdioxidaufnahmefähigkeit des Ozeans kennzeichnen, werden in Zukunft vermutlich geringer sein.

## A.2.2 Aufgaben innerhalb der zweiten Lernsitzung

### A.2.2.1 Lernumgebungen A 1 und A 2

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über den langfristigen Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [Langfristiger Kohlenstoffkreislauf](#). Erarbeiten Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (1.1) Beschreiben Sie zunächst kurz die dargestellten vier Kohlenstoffspeicher: „Atmosphäre“, „Biosphäre“, „Hydrosphäre“ und „Lithosphäre“. Wie viel Kohlenstoff ist in diesen Speichern enthalten? Informationen dazu erhalten Sie in dem Abschnitt [„Kohlenstoffspeicher“](#).
  - (1.2) Identifizieren Sie die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern. Nennen Sie die präsentierten Flussraten und die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt [„Anthropogener Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf“](#) auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#).
  - (1.3) Wie viel Kohlenstoff fließt in 100 Jahren aufgrund von Verwitterungsprozessen von der Lithosphäre in die Hydrosphäre und von der Atmosphäre in die Hydrosphäre? Berechnen Sie den Kohlenstofffluss. Nehmen Sie dazu an, dass sich die [Flussraten](#) während der 100 Jahre nicht ändern.

Zurzeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Prozesse im langfristigen Kohlenstoffkreislauf haben?

- (2) Informieren Sie sich zunächst über die Verwitterung von Silikatgesteinen. Verwenden Sie dafür die folgenden Abschnitte: [Silikatverwitterung](#), [Chemische Verwitterung und tropisches Klima \(A 1\)](#) oder [Silikatverwitterung und Kalkbildung \(A 2\)](#). Beschreiben Sie mit Hilfe dieser Abschnitte die möglichen Folgen einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre für die Silikatverwitterung. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (2.1) Beschreiben Sie zunächst kurz das Element „Verwitterung von Silikatgesteinen“.
  - (2.2) Beschreiben Sie dann die präsentierten Wirkungsbeziehungen zwischen den Elementen „Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre“, „Temperatur der Atmosphäre“ und „Verwitterung von Silikatgesteinen“.

- (2.3) Wie würde sich eine Schwächung oder eine Stärkung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen auf die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auswirken? Nutzen Sie dafür neben den Abschnitten [„Silikatverwitterung“](#) und [„Chemische Verwitterung und tropisches Klima“](#) (A 1) oder [„Silikatverwitterung und Kalkbildung“](#) (A 2) auch den Abschnitt [„Kreisprozesse“](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Die Lithosphäre enthält etwa 75.014.100 Gigatonnen Kohlenstoff. Sie ist der größte Kohlenstoffspeicher im System Erde. Die Atmosphäre enthält etwa 720 Gigatonnen Kohlenstoff, die Hydrosphäre etwa 38.000 Gigatonnen und die Biosphäre etwa 803 Gigatonnen. Die Atmosphäre speichert Kohlenstoff vor allem in Form von CO<sub>2</sub>. In der Hydrosphäre ist vor allem anorganisch gelöster Kohlenstoff enthalten, in der Biosphäre vor allem organische Verbindungen, aber auch biogene Carbonate. Die Lithosphäre speichert Kohlenstoff vor allem in Form von Carbonaten.
- (1.2) Der zentrale Kohlenstoffspeicher des langfristigen Kohlenstoffkreislaufs ist die Lithosphäre (Carbonate, Kerogen, fossile Rohstoffe). Wichtige Kohlenstoffflüsse werden durch den Aufbau, die Umwandlung und den Abbau kohlenstoffhaltiger Elemente der Lithosphäre bestimmt. Beispiele sind die Bildung von Kalkstein, Kohle und Erdöl, sowie die Gesteinsmetamorphose.

Die dargestellten Kohlenstoffflüsse beeinflussen den globalen Kohlenstoffkreislauf auf erdgeschichtlichen Zeitskalen, die von Tausenden bis zu Millionen oder Milliarden Jahren reichen. Zum langfristigen Kohlenstoffkreislauf zählt vor allem die Bildung von kohlenstoffhaltigen Lagerstätten, wie zum Beispiel die Erdölbildung aus sedimentiertem organischem Material im Ozean (0,01 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr), die Kalksteinbildung aus sedimentiertem Calciumcarbonat im Ozean (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr) und die Kohlebildung aus vorwiegend abgestorbenen terrestrischen Pflanzen.


Durch Vulkanismus, Diagenese und Gesteinsmetamorphose kann in der Lithosphäre gebundener Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre oder Hydrosphäre entgasen (0,1 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr). Durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein (CaCO<sub>3</sub>) wird ebenfalls Kohlenstoff aus der Lithosphäre in Form von Hydrogencarbonat-Ionen (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ins Wasser freigesetzt (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr). Zudem wird durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein und Sili-

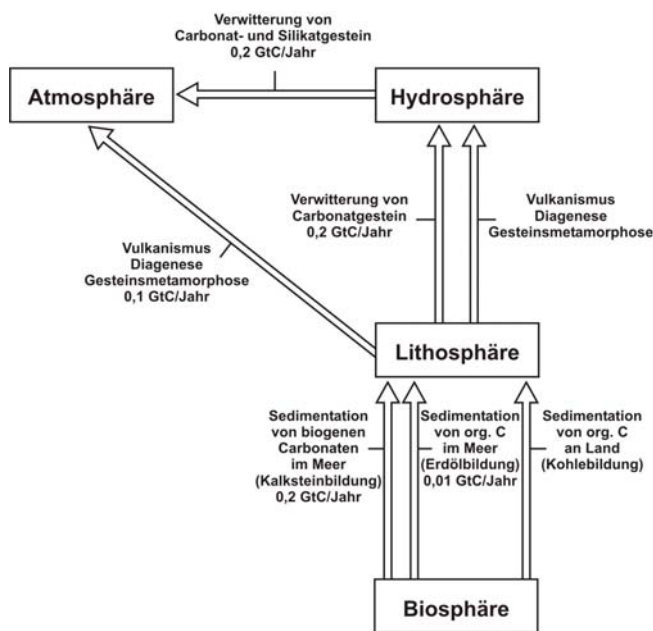
katgesteinen atmosphärisches  $\text{CO}_2$  in  $\text{HCO}_3^-$ -Ionen überführt (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr).

- (1.3) Durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein gelangen jährlich etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Hydrogencarbonat-Ionen ins Meer. Zudem werden durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein und Silikatgesteinen etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus der Atmosphäre (Kohlenstoffdioxid) in die Hydrosphäre (Hydrogencarbonat) überführt. Aus diesen Flussraten ergibt sich für 100 Jahre ein Fluss von 40 Gigatonnen Kohlenstoff  $((0,2 + 0,2) \cdot 100 = 40)$ .
- (2.1) Silikatverwitterung ist eine Form der chemischen Verwitterung. Silikatminerale reagieren mit Kohlenstoffdioxid und Wasser (Kohlensäure). Kationen der Silikatminerale werden abgespalten. Es entstehen andere Minerale. Die Silikatverwitterung ist verbunden mit einem Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre in die Hydrosphäre.
- (2.2) Eine Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre hat vermutlich einen Anstieg der Temperatur der Atmosphäre zur Folge. Höhere Temperaturen fördern die chemische Verwitterung von Silikatgesteinen. Dieser Prozess ist mit einer Abnahme des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre und einer Zunahme der Konzentration von Hydrogencarbonat-Ionen im Wasser verbunden.
- (2.3) Eine verminderte/erhöhte Verwitterungsrate hätte eine Erhöhung/Verminderung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre zur Folge. Eine Erhöhung/Verminderung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre hätte eine Erhöhung/Verminderung der Temperatur und damit eine Erhöhung/Verminderung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen zur Folge. Die Wirkungsbeziehungen bilden einen Regelkreis. Diese negative Rückkopplung regelt unter anderem den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre.


### A.2.2.2. Lernumgebungen B 1 und B 2

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über den langfristigen Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [Langfristiger Kohlenstoffkreislauf](#). Die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse sind hier in einem [Flussdiagramm](#) dargestellt .




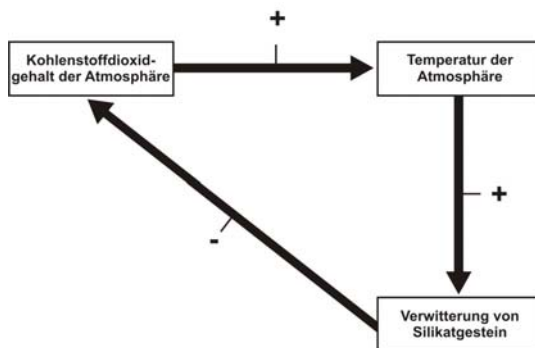
Die Pfeile stehen für Stoffflüsse. Sie zeigen in Richtung des Stoffflusses. Die Beschriftung der Flusspfeile zeigt die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen, und die Flussraten. Untersuchen Sie das Flussdiagramm. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

- (1.1) Identifizieren Sie zunächst die in diesem Flussdiagramm dargestellten Kohlenstoffspeicher und beschreiben Sie diese kurz. Wie viel Kohlenstoff ist in diesen Speichern enthalten? Informationen dazu erhalten Sie in dem Abschnitt [„Kohlenstoffspeicher“](#).
- (1.2) Gehen Sie dann auf die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern ein. Nennen Sie die präsentierten Flussraten und die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Nutzen Sie dafür neben dem Flussdiagramm  auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#).
- (1.3) Wie viel Kohlenstoff fließt in 100 Jahren aufgrund von Verwitterungsprozessen von der Lithosphäre in die Hydrosphäre und von der Atmosphäre in die Hydrosphäre?

Berechnen Sie den Kohlenstofffluss. Nehmen Sie dazu an, dass sich die [Flussraten](#) während der 100 Jahre nicht ändern.

Zurzeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Prozesse im langfristigen Kohlenstoffkreislauf haben?

- (2) Informieren Sie sich zunächst über die Verwitterung von Silikatgesteinen. Verwenden Sie dafür die folgenden Abschnitte: [Silikatverwitterung](#), [Chemische Verwitterung und tropisches Klima \(B 1\)](#) oder [Silikatverwitterung und Kalkbildung \(B 2\)](#). Die dort präsentierten möglichen Folgen einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre für die Silikatverwitterung sind hier in einem [Wirkungsdiagramm](#) dargestellt .



Die Pfeile stehen für Wirkungsbeziehungen. Sie verlaufen in Richtung der Wirkung. „+“ kennzeichnet eine gleichsinnige Korrelation. Es steht zum Beispiel für „je mehr ... desto mehr ...“ bzw. „je weniger ... desto weniger ...“ oder „je höher ... desto mehr ...“ bzw. „je niedriger ... desto weniger“. Demgegenüber kennzeichnet „-“ eine gegensinnige Korrelation. Es steht für „je mehr ... desto weniger ...“ bzw. „je weniger ... desto mehr ...“ oder „je höher ... desto weniger ...“ bzw. „je niedriger ... desto mehr“.

Untersuchen Sie das Wirkungsdiagramm. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

- (2.1) Beschreiben Sie zunächst kurz das in diesem Wirkungsdiagramm dargestellte Element „Verwitterung von Silikatgesteinen“.
- (2.2) Beschreiben Sie dann die in dem Wirkungsdiagramm dargestellten und in den Abschnitten [„Silikatverwitterung“](#) und [„Chemische Verwitterung und tropisches Klima \(B 1\)“](#) oder [„Silikatverwitterung und Kalkbildung \(B 2\)“](#) präsentierten Wirkungsbeziehungen zwischen den Elementen.
- (2.3) Wie würde sich eine Schwächung oder eine Stärkung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen auf die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auswirken? Nut-



zen Sie dafür neben dem Wirkungsdiagramm Bild 2 und den Abschnitten [„Silikatverwitterung“](#) und [„Chemische Verwitterung und tropisches Klima“](#) (B 1) oder [„Silikatverwitterung und Kalkbildung“](#) (B 2) auch den Abschnitt [„Kreisprozesse“](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Die Lithosphäre enthält etwa 75.014.100 Gigatonnen Kohlenstoff. Sie ist der größte Kohlenstoffspeicher im System Erde. Die Atmosphäre enthält etwa 720 Gigatonnen Kohlenstoff, die Hydrosphäre etwa 38.000 Gigatonnen und die Biosphäre etwa 803 Gigatonnen. Die Atmosphäre speichert Kohlenstoff vor allem in Form von  $\text{CO}_2$ . In der Hydrosphäre ist vor allem anorganisch gelöster Kohlenstoff enthalten, in der Biosphäre vor allem organische Verbindungen aber auch biogene Carbonate. Die Lithosphäre speichert Kohlenstoff vor allem in Form von Carbonaten.
- (1.2) Der zentrale Kohlenstoffspeicher des langfristigen Kohlenstoffkreislaufs ist die Lithosphäre (Carbonate, Kerogen, fossile Rohstoffe). Wichtige Kohlenstoffflüsse werden durch den Aufbau, die Umwandlung und den Abbau kohlenstoffhaltiger Elemente der Lithosphäre bestimmt. Beispiele sind die Bildung von Kalkstein, Kohle und Erdöl, sowie die Gesteinsmetamorphose.

Die dargestellten Kohlenstoffflüsse beeinflussen den globalen Kohlenstoffkreislauf auf erdgeschichtlichen Zeitskalen, die von Tausenden bis zu Millionen oder Milliarden Jahren reichen. Zum langfristigen Kohlenstoffkreislauf zählt vor allem die Bildung von kohlenstoffhaltigen Lagerstätten, wie zum Beispiel die Erdölbildung aus sedimentiertem organischem Material im Ozean (0,01 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr), die Kalksteinbildung aus sedimentiertem Calciumcarbonat im Ozean (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr) und die Kohlebildung aus vorwiegend abgestorbenen terrestrischen Pflanzen.

Durch Vulkanismus, Diagenese und Gesteinsmetamorphose kann in der Lithosphäre gebundener Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre oder Hydrosphäre entgasen (0,1 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr). Durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein ( $\text{CaCO}_3$ ) wird ebenfalls Kohlenstoff aus der Lithosphäre in Form von Hydrogencarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) ins Wasser freigesetzt (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr). Zudem wird durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein und Silikatgesteinen atmosphärisches  $\text{CO}_2$  in  $\text{HCO}_3^-$ -Ionen überführt (0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Jahr).

- (1.3) Durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein gelangen jährlich etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Hydrogencarbonat-Ionen ins Meer. Zudem werden durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein und Silikatgesteinen etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus der Atmosphäre (Kohlenstoffdioxid) in die Hydrosphäre (Hydrogencarbonat) überführt. Aus diesen Flussraten ergibt sich für 100 Jahre ein Fluss von 40 Gigatonnen Kohlenstoff  $((0,2 + 0,2) \cdot 100 = 40)$ .
- (2.1) Silikatverwitterung ist eine Form der chemischen Verwitterung. Silikatminerale reagieren mit Kohlenstoffdioxid und Wasser (Kohlensäure). Kationen der Silikatminerale werden abgespalten. Es entstehen andere Minerale. Die Silikatverwitterung ist verbunden mit einem Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre in die Hydrosphäre.
- (2.2) Eine Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre hat vermutlich einen Anstieg der Temperatur der Atmosphäre zur Folge. Höhere Temperaturen fördern die chemische Verwitterung von Silikatgesteinen. Dieser Prozess ist mit einer Abnahme des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre und einer Zunahme der Konzentration von Hydrogencarbonat-Ionen im Wasser verbunden.
- (2.3) Eine verminderte/erhöhte Verwitterungsrate hätte eine Erhöhung/Verminderung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre zur Folge. Eine Erhöhung/Verminderung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre hätte eine Erhöhung/Verminderung der Temperatur und damit eine Erhöhung/Verminderung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen zur Folge. Die Wirkungsbeziehungen bilden einen Regelkreis. Diese negative Rückkopplung regelt unter anderem den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre.

### A.2.2.3. Lernumgebungen C 1 und C 2

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Nutzen Sie für Ihre Antworten die Graphikfläche und die Textfläche auf der rechten Seite.

(1) Informieren Sie sich zunächst über den langfristigen Kohlenstoffkreislauf. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [„Langfristiger Kohlenstoffkreislauf“](#). Stellen Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse in einem [Flussdiagramm](#) dar. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

(1.1) Fügen Sie zunächst die vier Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Biosphäre“, „Hydrosphäre“ und „Lithosphäre“ über die Funktion **Textfeld** in die Graphikfläche ein. Wie viel Kohlenstoff ist in diesen Speichern enthalten? Informationen dazu erhalten Sie in dem Abschnitt [„Kohlenstoffspeicher“](#). Fügen Sie die herausgearbeiteten Speichergrößen in die Textfelder der erstellten Systemelemente mit ein.

(Sie können die Systemelemente verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)

(1.2) Identifizieren Sie die präsentierten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern und fügen Sie diese über die Funktion **1. Pfeil** in die Graphikfläche ein. Die Pfeile zeigen dabei in Richtung des Stoffflusses.

(Sie können die Pfeile verschieben und drehen sowie deren Länge ändern und sie auch wieder entfernen.)

(1.3) Nun sollen die Stoffflusspfeile beschriftet werden. Identifizieren Sie zunächst die präsentierten Flussraten, die die Kohlenstoffflüsse im langfristigen Kohlenstoffkreislauf kennzeichnen. Tragen Sie diese in die Graphikfläche ein. Verwenden Sie dafür die Funktion Pfeilbeschriftung und platzieren Sie die **Pfeilbeschriftung** an den Flusspfeilen. Identifizieren Sie dann die Prozesse, die diese Kohlenstoffflüsse bestimmen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt [„Langfristiger Kohlenstoffkreislauf“](#) auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#). Tragen Sie die dort herausgearbeiteten Prozesse in die bereits erstellten Textfelder an den Flusspfeilen mit ein.

(Sie können die Pfeilbeschriftungen verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)

(1.4) Wie viel Kohlenstoff fließt in 100 Jahren aufgrund von Verwitterungsprozessen von der Lithosphäre in die Hydrosphäre und von der Atmosphäre in die Hydrosphäre? Berechnen Sie den Kohlenstofffluss. Nehmen Sie dazu an, dass sich die [Flussraten](#) während der 100 Jahre nicht ändern. Tragen Sie Ihre Anmerkungen in die Textfläche unterhalb der Graphikfläche ein.

Zurzeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Prozesse im langfristigen Kohlenstoffkreislauf haben?

(2) Informieren Sie sich zunächst über die Verwitterung von Silikatgesteinen. Verwenden Sie dafür die folgenden Abschnitte: [„Silikatverwitterung“](#), [„Chemische Verwitterung und tropisches Klima“ \(C 1\)](#) oder [„Silikatverwitterung und Kalkbildung“ \(C 2\)](#). Stellen Sie die dort präsentierten möglichen Folgen einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre für die Silikatverwitterung in einem [Wirkungsdiagramm](#) dar. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

(2.1) Fügen Sie die Elemente „Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre“, „Temperatur der Atmosphäre“ und „Verwitterung von Silikatgestein“ über die Funktion **Textfeld** in die Graphikfläche ein.

(Sie können die Systemelemente verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)

(2.2) Identifizieren Sie mit Hilfe der Abschnitte [„Silikatverwitterung“](#) und [„Chemische Verwitterung und tropisches Klima“ \(C 1\)](#) oder [„Silikatverwitterung und Kalkbildung“ \(C 2\)](#) Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen und fügen Sie diese über die Funktion **2. Pfeil** in die Graphikfläche ein. Die Pfeile verlaufen dabei in Richtung der Wirkung. Die Wirkungspfeile sind durch „+“ oder „-“ gekennzeichnet. „+“ kennzeichnet eine gleichsinnige Korrelation. Es steht zum Beispiel für „je mehr ... desto mehr ...“ bzw. „je weniger ... desto weniger ...“ oder „je höher ... desto mehr ...“ bzw. „je niedriger ... desto weniger“. Demgegenüber kennzeichnet „-“ eine gegensinnig Korrelationen. Es steht für „je mehr ... desto weniger ...“ bzw. „je weniger ... desto mehr ...“ oder „je höher ... desto weniger ...“ bzw. „je niedriger ... desto mehr“.

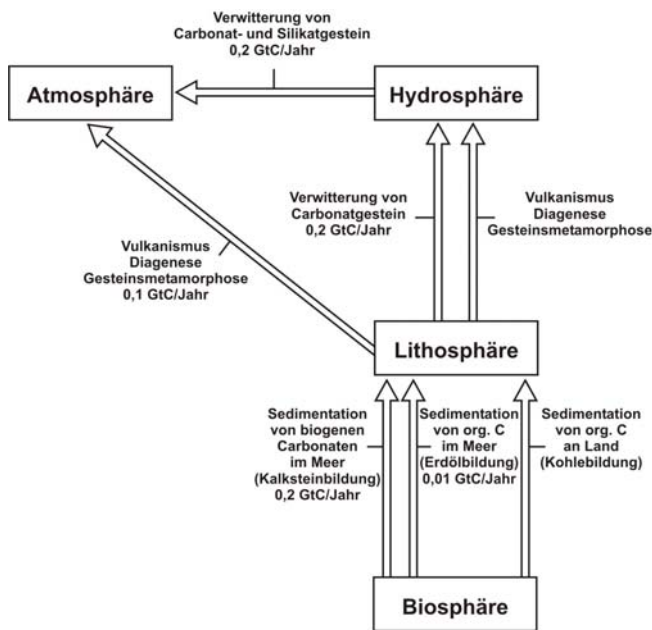
(Sie können die Pfeile verschieben und drehen sowie deren Länge und Kennzeichnung („+“ bzw. „-“ ändern und sie auch wieder entfernen.)

(2.3) Wie würde sich eine Schwächung oder einer Stärkung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen auf die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auswirken? Beantworten Sie diese Frage mit Hilfe des von Ihnen entwickelten Wirkungsdiagramms und dem Abschnitt [„Kreisprozesse“](#).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür den Button „Lösung“.

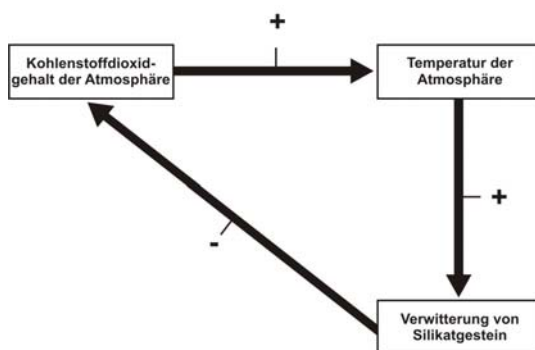
Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1) Ein Flussdiagramm wird in der Abbildung „Lösungsdiagramm 1“ dargestellt.



- (1.4) Durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein gelangen jährlich etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Hydrogencarbonat-Ionen ins Meer. Zudem werden durch die chemische Verwitterung von Carbonatgestein und Silikatgesteinen etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus der Atmosphäre (Kohlenstoffdioxid) in die Hydrosphäre (Hydrogencarbonat) überführt. Aus diesen Flussraten ergibt sich für 100 Jahre ein Fluss von 40 Gigatonnen Kohlenstoff  $((0,2 + 0,2) \cdot 100 = 40)$ .

- (2) Ein Wirkungsdiagramm wird in der Abbildung „Lösungsdiagramm 2“ dargestellt.



- (2.2) Eine verminderte/erhöhte Verwitterungsrate hätte eine Erhöhung/Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre zur Folge. Eine Erhöhung/Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre hätte eine Erhöhung/Verminderung der Temperatur und damit eine Erhöhung/Verminderung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen zur Folge. Die Wirkungsbeziehungen bilden einen Regelkreis. Diese negative Rückkopplung regelt unter anderem den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre.

## A.2.3 Aufgaben innerhalb der dritten Lernsitzung

### A.2.3.1. Lernumgebungen A 1 und A 2

Die [physikalische Kohlenstoffpumpe](#) ist für den [Kohlenstoffkreislauf im Ozean](#) und den [kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf](#) von zentraler Bedeutung. Sie ist vor allem im Nordatlantik aktiv. Dort kommt es zum Absinken gewaltiger Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern. Mit den Wassermassen gelangt gelöster anorganischer Kohlenstoff (Dissolved Inorganic Carbon, *DIC*) in die Tiefe. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) wird dem Austausch mit der Atmosphäre für längere Zeit entzogen. Die Tiefenwasserbildung ist Teil eines erdumspannenden Strömungssystems, dem [großen marinen Förderband](#). Das große marine Förderband wird unter anderem durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben, die auf unterschiedliche Temperaturen und unterschiedlichen Salzgehalt zurückzuführen sind. Es wird daher auch als globale thermohaline Zirkulation bezeichnet. Zum Teil ist das Strömungssystem aber auch windgetrieben oder beruht auf Niveauunterschieden des Meeresbodens.

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über die physikalische Kohlenstoffpumpe. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [„Physikalische Kohlenstoffpumpe“](#). Erarbeiten Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (1.1) Beschreiben Sie zunächst kurz die dargestellten Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Oberflächenwasser“ und „Tiefenwasser“.
  - (1.2) Identifizieren Sie die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern. Nennen Sie die präsentierten Flussraten und die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Nutzen Sie dafür neben dem Abschnitt [„Physikalische Kohlenstoffpumpe“](#) auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#).
  - (1.3) Welche Bedeutung haben die dargestellten Stoffflüsse für den globalen Kohlenstoffkreislauf? Wirkt der Ozean in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke?

Die Effektivität der [physikalischen Kohlenstoffpumpe](#) ist abhängig von der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik. Im Zusammenhang mit der beobachteten globalen Erwärmung (Anstieg der globalen Temperatur von 1860 bis 2000 um etwa 0,6°C) stellt sich die Frage nach der Entwicklung der [globalen thermohalinen Zirkulation](#). Welche Wirkung könnte eine weltweite Temperaturerhöhung auf das Verhalten des Strömungssystems haben? Bleibt die gegenwärtige Form der globalen thermohalinen Zirkulation in den nächsten Jahrhun-

dernten stabil? Wird sich die globale thermohaline Zirkulation verstärken oder ist sie im Begriff, zum Erliegen zu kommen?

- (2) Informieren Sie sich zunächst über die thermohaline Zirkulation. Verwenden Sie dafür die folgenden zwei Abschnitte: [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#), [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“](#) (A 1) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“](#) (A 2). Beschreiben Sie die dort präsentierten möglichen Folgen einer globalen Erwärmung für die globale thermohaline Zirkulation. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
- (2.1) Beschreiben Sie zunächst kurz die Elemente „globale Temperatur“, „Verdunstung in den Subtropen“, „Niederschlag über dem Nordatlantik“, „Wasserdampftransport vom Atlantik zum Pazifik“, „Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik“, Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik“ und „thermohaline Zirkulation“.
- (2.2) Identifizieren Sie mit Hilfe der Abschnitte [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#) und [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“](#) (A 1) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“](#) (A 2) Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen.
- (2.3) Welche Wirkung kann eine globale Erwärmung auf das Verhalten der globalen thermohalinen Zirkulation haben? Beantworten Sie die Frage mit Hilfe der Abschnitte [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#) und [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“](#) (A 1) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“](#) (A 2).

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür auf den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Die Atmosphäre enthält vor allem Kohlenstoffdioxid. Im Wasser ist Kohlenstoff vor allem als anorganisch gelöster Kohlenstoff, d. h. in Form von gelöstem Kohlenstoffdioxid, Hydrogencarbonat-Ionen und Carbonat-Ionen, enthalten.
- (1.2) Die oberflächennahen Schichten des Ozeans nehmen durch Diffusion zurzeit jährlich etwa 91,7 Gigatonnen Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf und geben zugleich etwa 90 Gigatonnen Kohlenstoff im Jahr wieder ab. Wesentlich schwächer ist der Austausch zwischen dem Oberflächenwasser und den tieferen Wassermassen. Etwa 33 Gigatonnen Kohlenstoff im Jahr werden durch vertikale Bewegung von Wassermassen in die Tiefen transportiert und etwa 42 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten.


- (1.3) Zurzeit nimmt der Ozean mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf als er an diese wieder abgibt. Er wirkt als Kohlenstoffsенke.
- (2.1) Dargestellt sind die Elemente „globale Temperatur“, „Verdunstung in den Subtropen“, „Niederschlag über dem Nordatlantik“, „Wasserdampftransport vom Atlantik zum Pazifik“, „Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik“, „Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik“ und „thermohaline Zirkulation“.
- (2.2) Eine globale Erwärmung könnte den weltweiten Wasserkreislauf fördern. Vor allem in den Subtropen könnte es zu einer stärkeren Verdunstung kommen. Dadurch würde sich auch der Wasserdampftransport aus diesen Regionen verstärken. Einerseits könnte der Wasserdampf in höhere Breiten transportiert werden. Dadurch könnte es zum Beispiel zu höheren Niederschlägen über dem Nordatlantik kommen. Der Süßwassereintrag hätte eine Verringerung des Salzgehalts des Oberflächenwassers im Nordatlantik zur Folge. Aufgrund dieser Erniedrigung der Dichte des Oberflächenwassers würde die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik verringert. Andererseits könnte der Wasserdampfexport auch einen Wassertransport aus dem Atlantik in den Pazifik, über die mittelamerikanische Landbrücke, bedeuten. Der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik würde dadurch steigen und sich somit die Dichte des Wassers erhöhen. Die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik würde stärker ausfallen.
- (2.3) Eine globale Erwärmung könnte eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation oder eine Verstärkung der thermohalinen Zirkulation zur Folge haben. Genaue Vorhersagen kann man nicht treffen. Man kann nur mögliche Szenarien beschreiben. Modellrechnungen zeigen, dass eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation als Folge der globalen Erwärmung wahrscheinlicher ist.

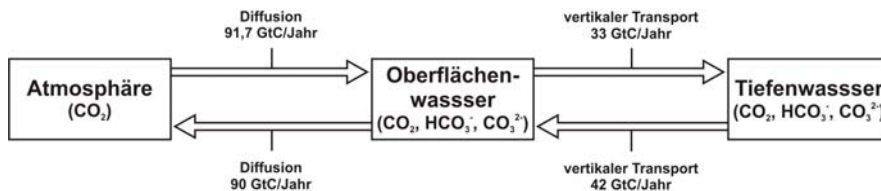


### A.2.3.2. Lernumgebungen B 1 und B 2


Die [physikalische Kohlenstoffpumpe](#) ist für den [Kohlenstoffkreislauf im Ozean](#) und den [kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf](#) von zentraler Bedeutung. Sie ist vor allem im Nordatlantik aktiv. Dort kommt es zum Absinken gewaltiger Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern. Mit den Wassermassen gelangt gelöster anorganischer Kohlenstoff (Dissolved Inorganic Carbon, *DIC*) in die Tiefe. Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) wird dem Austausch mit der Atmosphäre für längere Zeit entzogen. Die Tiefenwasserbildung ist Teil eines erdumspannenden Strömungssystems, dem [großen marinen Förderband](#). Das große marine Förderband wird unter anderem durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben, die auf unterschiedliche Temperaturen und unterschiedlichen Salzgehalt zurückzuführen sind. Es wird daher auch als globale thermohaline Zirkulation bezeichnet. Zum Teil ist das Strömungssystem aber auch windgetrieben oder beruht auf Niveauunterschieden des Meeresbodens.

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Notieren Sie Ihre Antworten in der Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über die physikalische Kohlenstoffpumpe. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [„Physikalische Kohlenstoffpumpe“](#). Die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse, sind hier in einem [Flussdiagramm](#) dargestellt .




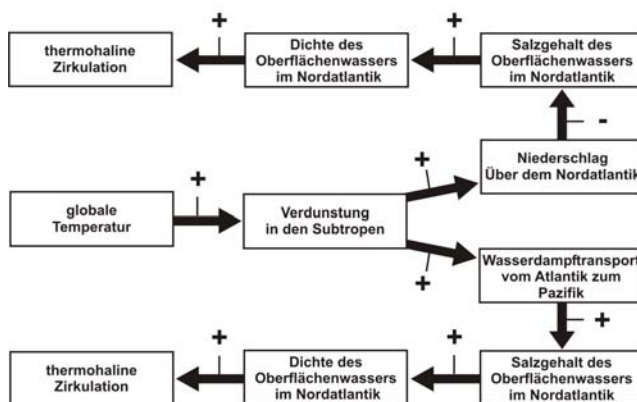
Die Pfeile stehen für Stoffflüsse. Sie zeigen in Richtung des Stoffflusses. Die Beschriftung der Flusspfeile zeigt die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen, und die Flussraten. Untersuchen Sie das Flussdiagramm. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

- (1.1) Identifizieren Sie zunächst die in diesem Flussdiagramm dargestellten Kohlenstoffspeicher und beschreiben Sie diese kurz.
- (1.2) Gehen Sie dann auf die dargestellten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen Speichern ein. Nennen Sie die präsentierten Flussraten und die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Nutzen Sie dafür neben dem Flussdiagramm  auch den gesamten Abschnitt [„Kohlenstoffflüsse“](#).

(1.3) Welche Bedeutung haben die dargestellten Stoffflüsse für den globalen Kohlenstoffkreislauf? Wirkt der Ozean in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke?

Die Effektivität der [physikalischen Kohlenstoffpumpe](#) ist abhängig von der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik. Im Zusammenhang mit der beobachteten globalen Erwärmung (Anstieg der globalen Temperatur von 1860 bis 2000 um etwa 0,6°C) stellt sich die Frage nach der Entwicklung der [globalen thermohalinen Zirkulation](#). Welche Wirkung könnte eine weltweite Temperaturerhöhung auf das Verhalten des Strömungssystems haben? Bleibt die gegenwärtige Form der globalen thermohalinen Zirkulation in den nächsten Jahrhunderten stabil? Wird sich die globale thermohaline Zirkulation verstärken oder ist sie im Begriff, zum Erliegen zu kommen?

(2) Informieren Sie sich zunächst über die thermohaline Zirkulation. Verwenden Sie dafür die folgenden zwei Abschnitte: [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#), [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“ \(B 1\)](#) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“ \(B 2\)](#). Die dort präsentierten möglichen Folgen einer globalen Erwärmung für die globale thermohaline Zirkulation sind hier in einem [Wirkungsdiagramm](#) dargestellt  .



Die Pfeile stehen für Wirkungsbeziehungen. Sie verlaufen in Richtung der Wirkung. „+“ kennzeichnet gleichsinnige Korrelationen. Es steht zum Beispiel für „je mehr ... desto mehr ...“ bzw. „je weniger ... desto weniger ...“ oder „je höher ... desto mehr ...“ bzw. „je niedriger ... desto weniger“. Demgegenüber kennzeichnet „-“ gegensinnige Korrelationen. Es steht für „je mehr ... desto weniger ...“ bzw. „je weniger ... desto mehr ...“ oder „je höher ... desto weniger ...“ bzw. „je niedriger ... desto mehr“.

Untersuchen Sie das Wirkungsdiagramm. Gehen Sie dabei wie unten beschrieben vor.

- (2.1) Beschreiben Sie zunächst kurz die in diesem Wirkungsdiagramm dargestellten Elemente.
- (2.2) Gehen Sie dann auf die dargestellten Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen ein.
- (2.3) Welche Wirkung kann eine globale Erwärmung auf das Verhalten der globalen thermohalinen Zirkulation haben? Beantworten Sie diese Frage mit Hilfe des hier dargestellten Wirkungsdiagramms?

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür auf den Button „Lösung“.

Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

- (1.1) Dargestellt sind die drei Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Oberflächenwasser“ und „Tiefenwasser“. Die Atmosphäre enthält vor allem Kohlenstoffdioxid. Im Wasser ist Kohlenstoff vor allem als anorganisch gelöster Kohlenstoff, d. h. in Form von gelöstem Kohlenstoffdioxid, Hydrogencarbonat-Ionen und Carbonat-Ionen, enthalten.
- (1.2) Die oberflächennahen Schichten des Ozeans nehmen durch Diffusion zurzeit jährlich etwa 91,7 Gigatonnen Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf und geben zugleich etwa 90 Gigatonnen Kohlenstoff im Jahr wieder ab. Wesentlich schwächer ist der Austausch zwischen dem Oberflächenwasser und den tieferen Wassermassen. Etwa 33 Gigatonnen Kohlenstoff im Jahr werden durch vertikale Bewegung von Wassermassen in die Tiefen transportiert und etwa 42 Gigatonnen gelangen wieder in die oberflächennahen Schichten.
- (1.3) Zurzeit nimmt der Ozean mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf als er an diese wieder abgibt. Er wirkt als Kohlenstoffsénke.
- (2.1) Dargestellt sind die Elemente „globale Temperatur“, „Verdunstung in den Subtropen“, „Niederschlag über dem Nordatlantik“, „Wasserdampftransport vom Atlantik zum Pazifik“, „Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik“, „Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik“ und „thermohaline Zirkulation“.
- (2.2) Eine globale Erwärmung könnte den weltweiten Wasserkreislauf fördern. Vor allem in den Subtropen könnte es zu einer stärkeren Verdunstung kommen. Dadurch würde sich auch der Wasserdampftransport aus diesen Regionen verstärken. Einerseits könnte der Wasserdampf in höhere Breiten transportiert werden. Dadurch könnte es zum Beispiel zu höheren Niederschlägen über dem Nordatlantik kommen. Der Süß-

wassereintrag hätte eine Verringerung des Salzgehalts des Oberflächenwassers im Nordatlantik zur Folge. Aufgrund dieser Erniedrigung der Dichte des Oberflächenwassers würde die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik verringert. Andererseits könnte der Wasserdampfexport auch einen Wassertransport aus dem Atlantik in den Pazifik, über die mittelamerikanische Landbrücke, bedeuten. Der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik würde dadurch steigen und sich somit die Dichte des Wassers erhöhen. Die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik würde stärker ausfallen.

- (2.3) Eine globale Erwärmung könnte eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation oder eine Verstärkung der thermohalinen Zirkulation zur Folge haben. Genaue Vorhersagen kann man nicht treffen. Man kann nur mögliche Szenarien beschreiben. Modellrechnungen zeigen, dass eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation als Folge der globalen Erwärmung wahrscheinlicher ist.

### A.2.3.3. Lernumgebungen C 1 und C 2

Die [physikalische Kohlenstoffpumpe](#) ist für den [Kohlenstoffkreislauf im Ozean](#) und den [kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf](#) von zentraler Bedeutung. Sie ist vor allem im Nordatlantik aktiv. Dort kommt es zum Absinken gewaltiger Wassermassen bis in Tiefen von zwei bis drei Kilometern. Mit den Wassermassen gelangt gelöster anorganischer Kohlenstoff (Dissolved Inorganic Carbon, *DIC*) in die Tiefe. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) wird dem Austausch mit der Atmosphäre für längere Zeit entzogen. Die Tiefenwasserbildung ist Teil eines erdumspannenden Strömungssystems, dem [großen marinen Förderband](#). Das große marine Förderband wird unter anderem durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben, die auf unterschiedliche Temperaturen und unterschiedlichen Salzgehalt zurückzuführen sind. Es wird daher auch als globale thermohaline Zirkulation bezeichnet. Zum Teil ist das Strömungssystem aber auch windgetrieben oder beruht auf Niveauunterschieden des Meeresbodens.

Bearbeiten Sie folgenden Aufgaben. Nutzen Sie für Ihre Antworten die Graphikfläche und die Textfläche auf der rechten Seite.

- (1) Informieren Sie sich zunächst über die physikalische Kohlenstoffpumpe. Verwenden Sie dafür folgenden Abschnitt: [„Physikalische Kohlenstoffpumpe“](#). Stellen Sie die in diesem Abschnitt präsentierten Kohlenstoffflüsse in einem [Flussdiagramm](#) dar. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
  - (1.1) Fügen Sie zunächst die drei Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“, „Oberflächenwasser“ und „Tiefenwasser“ über die Funktion **Textfeld** in die Graphikfläche ein.  
(Sie können die Systemelemente verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)
  - (1.2) Identifizieren Sie die präsentierten Kohlenstoffflüsse zwischen diesen drei Speichern und fügen Sie diese über die Funktion **1. Pfeil** in die Graphikfläche ein. Die Pfeile zeigen dabei in Richtung des Stoffflusses.  
(Sie können die Pfeile verschieben und drehen sowie deren Länge ändern und sie auch wieder entfernen.)
  - (1.3) Nun sollen die Stoffflusspfeile beschriftet werden. Identifizieren Sie mit Hilfe der Texte und des Bildes im Abschnitt [„Physikalische Kohlenstoffpumpe“](#) zunächst die Prozesse, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen. Tragen Sie diese in die Graphikfläche ein. Verwenden Sie dafür die Funktion **Pfeilbeschriftung** und platzieren Sie die Pfeilbeschriftung an den Flusspfeilen. Identifizieren Sie dann die Flussraten, die die Kohlenstoffflüsse kennzeichnen. Tragen Sie die dort herausgearbeiteten Flussraten in die bereits erstellten Textfelder an den Flusspfeilen mit ein.  
(Sie können die Pfeilbeschriftungen verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)

- (1.4) Welche Bedeutung haben die von Ihnen herausgearbeiteten Stoffflüsse für den globalen Kohlenstoffkreislauf? Wirkt der Ozean in Bezug auf die Atmosphäre zurzeit als Kohlenstoffquelle oder Kohlenstoffsenke?

Die Effektivität der [physikalischen Kohlenstoffpumpe](#) ist abhängig von der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik. Im Zusammenhang mit der beobachteten globalen Erwärmung (Anstieg der globalen Temperatur von 1860 bis 2000 um etwa 0,6°C) stellt sich die Frage nach der Entwicklung der [globalen thermohalinen Zirkulation](#). Welche Wirkung könnte eine weltweite Temperaturerhöhung auf das Verhalten des Strömungssystems haben? Bleibt die gegenwärtige Form der globalen thermohalinen Zirkulation in den nächsten Jahrhunderten stabil? Wird sich die globale thermohaline Zirkulation verstärken oder ist sie im Begriff, zum Erliegen zu kommen?

- (2) Informieren Sie sich zunächst über die thermohaline Zirkulation. Verwenden Sie dafür die folgenden zwei Abschnitte: [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#), [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“](#) (C 1) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“](#) (C 2). Stellen Sie die dort präsentierten möglichen Folgen einer globalen Erwärmung für die globale thermohaline Zirkulation und in einem [Wirkungsdiagramm](#) dar. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:

- (2.1) Fügen Sie die Elemente „globale Temperatur“, „Verdunstung in den Subtropen“, „Niederschlag über dem Nordatlantik“, „Wasserdampftransport vom Atlantik zum Pazifik“, „Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik“, „Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik“ und „thermohaline Zirkulation“ über die Funktion **Textfeld** in die Graphikfläche ein.

(Sie können die Systemelemente verschieben, ändern und auch wieder entfernen.)

- (2.2) Identifizieren Sie mit Hilfe der Abschnitte [„Die globale thermohaline Zirkulation im Treibhausklima“](#), [„Die globale thermohaline Zirkulation in der Vergangenheit“](#) (C 1) oder [„Die globale thermohaline Zirkulation und ihr Energietransport“](#) (C 2) Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Elementen und fügen Sie diese über die Funktion **2. Pfeil** in die Graphikfläche ein. Die Pfeile verlaufen dabei in Richtung der Wirkung. Die Wirkungspfeile sind durch „+“ oder „-“ gekennzeichnet. „+“ kennzeichnet eine gleichsinnige Korrelation. Es steht zum Beispiel für „je mehr ... desto mehr ...“ bzw. „je weniger ... desto weniger ...“ oder „je höher ... desto mehr ...“ bzw. „je niedriger ... desto weniger“. Demgegenüber kennzeichnet „-“ eine gegensinnig Korrelationen. Es steht für „je mehr ... desto weniger ...“ bzw. „je weniger ... desto mehr ...“ oder „je höher ... desto weniger ...“ bzw. „je niedriger ... desto mehr“.

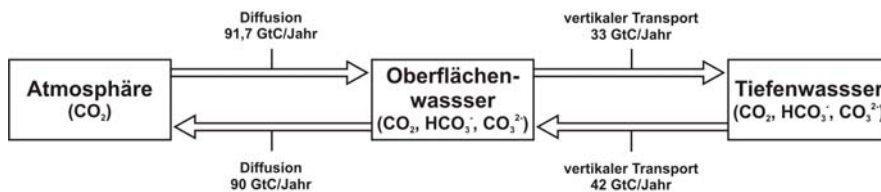
(Sie können die Pfeile verschieben und drehen sowie deren Länge und Kennzeichnung („+“ bzw. „-“ ändern und sie auch wieder entfernen.)

(2.3) Welche Wirkung kann eine globale Erwärmung auf das Verhalten der globalen thermohalinen Zirkulation haben? Beantworten Sie diese Frage mit Hilfe des von Ihnen entwickelten Wirkungsdiagramms?

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, können Sie sich eine Beispiellösung ansehen. Drücken Sie dafür auf den Button „Lösung“.

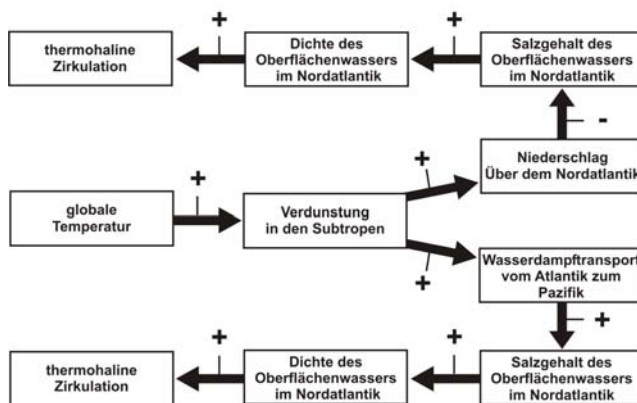
Im Folgenden werden Beispiellösungen der Aufgaben vorgestellt. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit den hier dargestellten Lösungsmöglichkeiten.

(1) Ein Flussdiagramm wird in Abbildung „Lösungsdiagramm 1“ dargestellt.



(1.4) Zurzeit nimmt der Ozean mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf als er an diese wieder abgibt. Er wirkt als Kohlenstoffsenke.

(2.2) Ein Wirkungsdiagramm wird in Abbildung „Lösungsdiagramm 2“ dargestellt.



(2.3) Eine globale Erwärmung könnte den weltweiten Wasserkreislauf fördern. Vor allem in den Subtropen könnte es zu einer stärkeren Verdunstung kommen. Dadurch würde sich auch der Wasserdampftransport aus diesen Regionen verstärken. Einerseits könnte der Wasserdampf in höhere Breiten transportiert werden. Dadurch könnte es zum Beispiel zu höheren Niederschlägen über dem Nordatlantik kommen. Der Süß-

wassereintrag hätte eine Verringerung des Salzgehalts des Oberflächenwassers im Nordatlantik zur Folge. Aufgrund dieser Erniedrigung der Dichte des Oberflächenwassers würde die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik verringert. Andererseits könnte der Wasserdampfexport auch einen Wassertransport aus dem Atlantik in den Pazifik, über die mittelamerikanische Landbrücke, bedeuten. Der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Nordatlantik würde dadurch steigen und sich somit die Dichte des Wassers erhöhen. Die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik würde stärker ausfallen.

Eine globale Erwärmung könnte also eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation oder eine Verstärkung der thermohalinen Zirkulation zur Folge haben. Genaue Vorhersagen kann man nicht treffen. Man kann nur mögliche Szenarien beschreiben. Modellrechnungen zeigen, dass eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation als Folge der globalen Erwärmung wahrscheinlicher ist.



### A.3 Begleitbögen

The image shows a screenshot of a chemistry learning application with several callout boxes providing instructions on how to use the interface. The interface itself is divided into a top navigation bar with buttons for 'STARTSEITE', 'GLOSSAR', and 'AUFGABE'. Below this, there are two main content areas. The left area features a 'Kohlenstoffspeicher' section with a list of bullet points and a small 3D diagram of a landscape. The right area contains a text block with a blue background, also titled 'Kohlenstoffspeicher', which discusses carbon storage in different forms and its role in climate change. The annotations are as follows:

- Im Inhaltsfenster** können Sie die Kapitel der Anwendung auswählen. Mit "+", gekennzeichnete Kapitel haben Unterkapitel. Wenn Sie ein Kapitel anklicken, werden die zugehörigen Unterkapitel aufgeklappt und alle anderen Kapitel zugeklappt.
- Auf der **Startseite** können Sie auch Zwischenspeicherungen vornehmen.
- Im **Index** können Sie nach bestimmten Stichwörtern suchen und das entsprechende Kapitel direkt anwählen.
- Im **Glossar** werden Fachbegriffe erklärt.
- Unter **Aufgabe** können Sie die Aufgabe lesen und bearbeiten.
- Hier können Sie **zurück** zur zuletzt gesehenen Seite bzw. wieder **vor** gehen.
- Per Klick auf dieses Symbol wird das zur Textstelle gehörende Bild aufgerufen.
- Blau kursiv** gesetzte Begriffe sind **Glossar**begriffe. Per Klick wird eine Erklärung des Begriffs im Glossar aufgerufen.
- Blau unterstrichen** gesetzte Begriffe sind **Links in andere Kapitel**. Per Mausklick wird das entsprechende Kapitel aufgerufen.

The interface content includes:

- Startseite:**
  - Inhalt:**
    - Kohlenstoffspeicher
    - Kohlenstoffspeicher
    - Kohlenstoff in der Atmosphäre
    - Kohlenstoff in der Hydrosphäre
    - Kohlenstoff in der Lithosphäre
    - Kohlenstoff in der Pedosphäre
    - Einwirkung des Systems Erde
    - Prognose, die die Kohlenstoffflüsse bestimmen
    - Kohlenstoffkreislauf
- Kohlenstoffspeicher (Textblock):**
  - Als Kohlenstoffspeicher bezeichnet man ein physikalisches oder chemisches Reservoir, das Kohlenstoff in verschiedenen Verbindungen speichert. Die Beispiele, die Hydrophäre und der Lithosphäre sind Bergsteine, Kohlenstoffdioxid, die in Gasen, sich in weiter entfernten Speichern speichern.
  - Je nach Speicher existiert Kohlenstoff in unterschiedlichen chemischen Bindungsformen und Abgabepotenzialen. Zudem auch in sehr unterschiedlichen Mengen. Die Größe eines Kohlenstoffspeichers ergibt sich aus Abgabebestimmungen (Abgabefähigkeit). Je nach Speicher können unterschiedliche Zyklenwerke wirksam sein. Welche neue Erkenntnisse, aufgrund verschiedener Verschiebungen oder Rechenrechnungen, in die Modellrechnungen mit einbezogen, kann man zu anderen Aussagen kommen.
  - Änderungen der Speichergrößen bestimmen unter anderem die Entwicklung des **Klimasystems**. Wenn ein Kohlenstoffspeicher nimmt ab, dann können die daraus resultierenden Veränderungen im Kohlenstoffzyklus zu einer Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre führen, was wiederum zu einer globalen Erwärmung führt.

Meine Lösung:  
Diagramm 1 Diagramm 2

Textfeld einfügen Pfeil einfügen  
Länge (des markierten Pfeils) verändern + oder -  
Preisbeschriftung einfügen  
Objekt löschen

1. Pfeil 2. Pfeil  
Preisbeschriftung  
Textfeld

Mit diesen Buttons kann man zwischen den beiden Diagrammen hin und her wechseln. (nur bei Aufgabe 2 und 3)

Objekte lassen sich **verschieben**, indem man sie am **roten Rahmen** anfasst

Pfeile lassen sich **drehen**, indem man mit der Maus auf den **Pfeilkörper** klickt und dann die Maus bewegt

The image shows a software interface for creating diagrams. On the left is a toolbar with several icons: a text box icon, an arrow icon, a price label icon, and a delete icon. Below the icons are labels: 'Textfeld einfügen', 'Pfeil einfügen', 'Länge (des markierten Pfeils) verändern + oder -', 'Preisbeschriftung einfügen', and 'Objekt löschen'. The main workspace is a grid with a light blue background. It contains two diagrams, 'Diagramm 1' and 'Diagramm 2', each with a red border. 'Diagramm 1' shows a black arrow pointing right. 'Diagramm 2' shows a black arrow pointing up and to the right. A text box labeled 'Textfeld' is positioned between the two diagrams. A mouse cursor is shown over the arrow in 'Diagramm 2', with a curved arrow indicating rotation. Another mouse cursor is shown over the red border of 'Diagramm 2', with a straight arrow indicating movement. The text '1. Pfeil' and '2. Pfeil' points to the arrows in the two diagrams respectively. The text 'Preisbeschriftung' points to a label above the arrow in 'Diagramm 2'. The text 'Textfeld' points to the text box. The text 'Objekt löschen' points to the delete icon in the toolbar. The text 'Länge (des markierten Pfeils) verändern + oder -' points to the arrow length adjustment icons in the toolbar. The text 'Preisbeschriftung einfügen' points to the price label icon in the toolbar. The text 'Objekt löschen' points to the delete icon in the toolbar. The text 'Textfeld einfügen' points to the text box icon in the toolbar. The text 'Pfeil einfügen' points to the arrow icon in the toolbar. The text 'Meine Lösung: Diagramm 1 Diagramm 2' is at the top left. The text 'Mit diesen Buttons kann man zwischen den beiden Diagrammen hin und her wechseln. (nur bei Aufgabe 2 und 3)' is at the bottom left. The text 'Objekte lassen sich verschieben, indem man sie am roten Rahmen anfasst' is at the bottom right. The text 'Pfeile lassen sich drehen, indem man mit der Maus auf den Pfeilkörper klickt und dann die Maus bewegt' is at the top right.

# Anhang B Fragebögen

## B.1 Vortestfragebogen



**Liebe Schülerinnen,  
liebe Schüler,**

vielen herzlichen Dank schon vorab für Ihre Teilnahme an dieser Studie. Sie werden mit der Lernsoftware „Der globale Kohlenstoffkreislauf im System Erde“ arbeiten. Wir möchten erfahren, wie sich Ihr Verständnis vom globalen Kohlenstoffkreislauf beim Lernen mit dieser Software verändert und welchen Einfluss spezifische Treatments auf Ihren Lernprozess haben.

Die Studie gliedert sich in drei Lernsitzen (à 90 Minuten), in denen Sie einzeln an einem PC Aufgaben zum Thema bearbeiten, sowie einen Vortest (45 Minuten) und einen Nachtest (45 Minuten).

Sie können wesentlich zur Qualität dieser Studie beitragen, indem Sie die Fragen des Tests und die Aufgaben in den Lernsitzen sorgfältig bearbeiten.

Alle während der Studie erhobenen Daten werden streng vertraulich behandelt und nur für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet.

**Viel Spaß bei der Bearbeitung.**

© 2003 · Kristin Hildebrandt · IPN

# 1. Fragebogen

Datum

Benutzername C1

Der Benutzername dient der eindeutigen Zuordnung der Fragebögen zu den Lernprotokollen und der Fragebögen zueinander bei gleichzeitiger Wahrung der Anonymität.

Ihren Benutzernamen erstellen Sie wie folgt:

1. Tragen Sie in das erste Kästchen den **Anfangsbuchstaben des Vornamens Ihrer Mutter** ein.
2. Tragen Sie in das zweite Kästchen den **Anfangsbuchstaben des Vornamens Ihres Vaters** ein.
3. Tragen Sie in die hinteren vier Kästchen den **Geburtsstag (TTMM) Ihrer Mutter** ein.

### Beispiel:

Ihre Mutter heißt Elke, Ihr Vater Jochen und Ihre Mutter hat am 17. Februar Geburtstag. Dann lautet Ihr Benutzername:

C1  E  J  1  7  0  2

**Achten Sie bei der Bearbeitung der Fragen bitte auf Folgendes:**

#### im Teil 1:

Bitte setzen Sie nur **ein Kreuz pro Frage** in ein Kästchen. Wenn Sie ein Kreuz zwischen zwei Kästchen einfügen, wird die Antwort für uns wertlos.

#### im Teil 2:

Bei den Ankreuzfragen ist immer **nur eine Antwort richtig!**

Bitte versuchen Sie auf alle Fragen zu antworten. Geben Sie bitte auch eine Antwort, wenn Sie sich nicht sicher sind. Der Fragebogen wird nicht bewertet. Für uns ist jede Ihrer Antworten wichtig.

## Zunächst benötigen wir einige Angaben zu Ihrer Person:

Ihr Geschlecht: weiblich männlich

Ihr Alter: \_\_\_\_\_ Jahre

Ihre Leistungskurse: \_\_\_\_\_

Welches Fach mögen Sie am liebsten? \_\_\_\_\_

Welches Fach mögen Sie am wenigsten? \_\_\_\_\_

Welches war Ihre letzte Zeugnisnote in Biologie? \_\_\_\_\_ (Halbjahr: \_\_\_\_\_)

in Chemie? \_\_\_\_\_ (Halbjahr: \_\_\_\_\_)

in Physik? \_\_\_\_\_ (Halbjahr: \_\_\_\_\_)

in Geographie? \_\_\_\_\_ (Halbjahr: \_\_\_\_\_)

in Mathematik? \_\_\_\_\_ (Halbjahr: \_\_\_\_\_)

© 2003 · Kristin Hildebrandt · IPN

## Teil 1

	trifft nicht zu	trifft etwas zu	trifft ziemlich zu	trifft völlig zu
Graphiken helfen mir beim Merken von Inhalten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe schon oft mit Lernprogrammen gearbeitet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Lernen am Computer habe ich noch nie gemocht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Lernen am Computer finde ich anregend und spannend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich lese sehr langsam.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Um eine Aufgabe zu lösen, erstelle ich häufig eine Graphik.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich denke oft in Bildern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Lernen am Computer finde ich nicht gerade interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
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"/>
Ich finde es schwierig, mir etwas bildlich vorzustellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es fällt mir leicht Diagramme zu interpretieren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
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"/>
Ich arbeite sehr Häufig mit dem Computer.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich weiß eine ganze Menge über Computer.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es fällt mir leicht Graphiken zu erstellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## Teil 2

1. Die Stoffe A und B reagieren zu C und D. Die Stoffe C und D können wieder zu A und B rückreagieren. Die Gesamtreaktion lautet somit:  $A + B \rightleftharpoons C + D$ . Das Reaktionssystem befindet sich im chemischen Gleichgewicht, wenn ...

- die Konzentration der Anfangsstoffe gleich der Konzentration der Endstoffe ist.
- die Konzentration der Anfangs- und Endstoffe konstant bleiben.
- die Hinreaktion genauso viel Energie freisetzt wie die Rückreaktion.
- die Hinreaktion und Rückreaktionen nicht mehr ablaufen.

2. Um elementaren Kohlenstoff handelt es sich bei ...

- Kohle.
- Erdöl und Erdgas.
- Diamant und Graphit.
- Carbonaten.

3. Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) reagiert mit Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) nach folgenden Gleichgewichtsreaktionen ( $\text{H}_2\text{CO}_3$  Kohlensäure,  $\text{HCO}_3^-$  Hydrogencarbonat-Ionen,  $\text{H}_3\text{O}^+$  Hydronium-Ionen,  $\text{CO}_3^{2-}$  Carbonat-Ionen):



Leitet man Kohlenstoffdioxid nicht in Wasser sondern in Natronlauge ( $\text{NaOH}$ ) ein, löst sich ...

- mehr Kohlenstoffdioxid.
- weniger Kohlenstoffdioxid.
- genauso viel Kohlenstoffdioxid.
- gar kein Kohlenstoffdioxid.

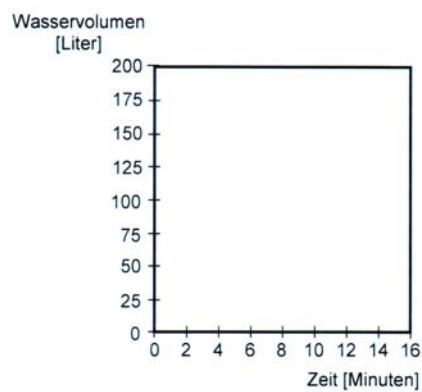
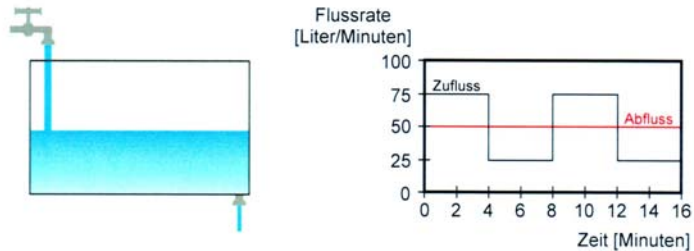
4. Wie lautet die Bruttogleichung der Fotosynthese?

---

5. Was versteht man unter einem Oxidationsmittel?

- Elektronenakzeptor
- Elektronendonator
- Protonenakzeptor
- Protonendonator

6. Betrachten Sie die unten dargestellte Wasserwanne. Wasser fließt mit einer bestimmten Zuflussrate ein und mit einer anderen Flussrate über einen Abfluss aus. Der Graph zeigt das hypothetische Verhalten des Zuflusses (schwarze Linie) und des Abflusses (rote Linie). Verwenden Sie diese Informationen, um in den zweiten Graphen das Wasservolumen in der Wasserwanne einzuzeichnen. Nehmen Sie dazu an, dass das Wasservolumen in der Wanne zu Beginn (zum Zeitpunkt 0) 100 Liter beträgt.



7. Die Zellatmung ist ...
- ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in organische Verbindungen eingebaut wird.
  - ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus anorganischen Verbindungen gebildet wird.
  - ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus organischen Verbindungen gebildet wird.
  - ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in anorganische Verbindungen eingebaut wird.
8. Erdöl entsteht überwiegend aus ...
- abgestorbenen, mikroskopisch kleinen Algen.
  - Kalkschalen von Meeresorganismen.
  - abgestorbenen Landpflanzen.
  - abgestorbenen Bakterien und Pilzen.

9. Die unten stehende Tabelle zeigt, wie viele Fahrräder auf dem Schulhof im Laufe eines Tages ankommen beziehungsweise abfahren.

Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder	Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder
05:00 – 06:00	0	0	14:00 – 15:00	24	48
06:00 – 07:00	11	1	15:00 – 16:00	15	59
07:00 – 08:00	44	2	16:00 – 17:00	10	98
08:00 – 09:00	92	11	17:00 – 18:00	16	35
09:00 – 10:00	53	17	18:00 – 19:00	9	22
10:00 – 11:00	42	12	19:00 – 20:00	4	8
11:00 – 12:00	37	25	20:00 – 21:00	3	5
12:00 – 13:00	24	31	21:00 – 22:00	1	2
13:00 – 14:00	47	55	22:00 – 23:00	0	0

Können Sie aus der Tabelle ermitteln, zu welcher Stunde die meisten Fahrräder auf dem Schulhof stehen?

- Ja, mit folgender Methode:

---



---



---



---

In der Stunde von \_\_\_\_ bis \_\_\_\_ Uhr stehen die meisten Fahrräder auf dem Schulhof.

- Nein, weil ...

---



---



---



---

Können Sie aus der Tabelle entnehmen, in welcher Stunde die meisten Fahrräder vom Schulhof fahren?

- Ja, mit folgender Methode:

---



---



---



---

In der Stunde von \_\_\_\_ bis \_\_\_\_ Uhr fahren die meisten Fahrräder vom Schulhof.

- Nein, weil ...

---



---



---



---



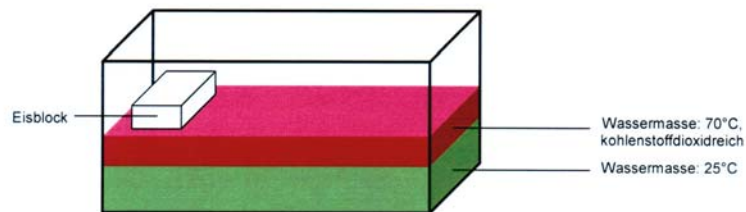
10. Welche der folgenden Aussagen ist nicht richtig?

- Wasser mit einem Salzgehalt von 35‰ hat eine höhere Dichte als Wasser mit einem Salzgehalt von 34‰.
- Eis hat eine höhere Dichte als 4°C warmes Wasser.
- Wasser mit einer Temperatur von 4°C hat eine höhere Dichte als 10°C.
- Mit steigendem hydrostatischen Druck nimmt die Dichte des Wassers zu.

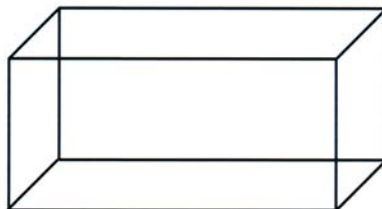
11. Als Diffusion bezeichnet man ...

- den Transport von Teilchen durch eine Biomembran mit Hilfe von Trägerproteinen (Carrier).
- die durch Eigenbewegung von Teilchen erfolgende gleichmäßige Verteilung der Teilchen im Raum.
- den Ausgleichsprozess von Konzentrationsunterschieden in flüssigen Stoffen.
- den Transport von Teilchen gegen ihr Konzentrationsgefälle.

12. Unterschiede in der Dichte von Wassermassen führen bei geringen turbulenten Durchmischungen durch Wind oder Wellen zu Schichtungen der Gewässer. In eine Glaswanne wurden 3 Liter Leitungswasser mit einer Temperatur von 25°C gefüllt. Dann wurden 1,5 Liter Leitungswasser auf 70°C erhitzt und vorsichtig in die Glaswanne gefüllt. Es kommt zu einer Schichtung der Wassermassen. Beide Wassermassen wurden zu Beginn des Versuchs mit einer Indikatorlösung versetzt. Zudem wurde beiden Wassermassen Salzsäure bis zum Umschlagspunkt des Indikators nach graugrün hinzugefügt. Mit Hilfe einer Fritte wird für etwa 30 Sekunden Kohlenstoffdioxid in die obere Wasserschicht geleitet, bis sich diese deutlich violett färbt.



Was geschieht unmittelbar nachdem ein Eisblock auf die Wasseroberfläche gelegt wird? Zeichnen Sie Ihre Lösung in die unten stehende Abbildung ein.



13. Welche der folgenden Aussagen trifft für die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in Wasser (H<sub>2</sub>O) zu?

- Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser besser als in kälterem.
- Kohlenstoffdioxid löst sich in kälterem Wasser besser als in wärmerem.
- Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser genau so stark wie in kälterem.
- Kohlenstoffdioxid löst sich überhaupt nicht in Wasser.

14. Grüne Pflanzen nehmen bei der Fotosynthese Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre auf und bauen dieses in organische Verbindungen ein. Bei der Zellatmung werden organische Verbindungen abgebaut. CO<sub>2</sub> wird wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die Fotosyntheseleistung kann bei ausreichender Lichtintensität und genügend Wasser durch Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft steigen.

Kennzeichnen sie die im Text beschriebenen Beziehungen zwischen den Kohlenstoffspeichern Atmosphäre und Biosphäre. Differenzieren Sie zwischen den Stoffflüssen und den Wirkungsbeziehungen.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

15. Nennen Sie biochemische und geochemische Prozesse, die Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen auf der Erde umsetzen.

*biochemische Prozesse* Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung biotischer (belebter) Systeme abläuft.

*geochemische Prozesse* Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung abiotischer (unbelebter) Systeme abläuft.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

16. Bei der Verwitterung von Kalksteinen (besteht überwiegend aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ )) ...

- entstehen Hydrogencarbonat-Ionen.
- wird Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in die Atmosphäre freigesetzt.
- reagieren Carbonatminerale mit Silikatmineralen.
- wird Kohlenstoff in der Lithosphäre gespeichert.

17. Destruenten ...

- sind Organismen, die abgestorbene organische Substanz zersetzen.
- sind Organismen, die sich von im Boden lebenden Organismen ernähren.
- sind Organismen, die anorganische Substanz in organische umwandeln.
- bilden das Anfangsglied der Nahrungskette.

18. Welche der folgenden Aussagen zur Nahrungskette ist richtig?

- Die im Körper aus der Nahrung aufgebaute organische Substanz enthält genauso viel Energie, wie in der Nahrung enthalten war.
- Die Biomasse nimmt beim Durchgang durch die Nahrungskette, von den Produzenten zu den Konsumenten höherer Ordnung zu.
- Vor allem leicht abbaubare Schadstoffe werden über die Nahrungskette angereichert.
- Die Nahrungsproduktion ist letztlich vom Sonnenlicht abhängig.

**Toll, Sie haben es geschafft.  
Danke, dass Sie mitgemacht haben!**



## Wichtig!

Tragen Sie hier noch einmal ihren

**Benutzernamen** C1

von oben ein.

Trennen Sie diesen Abschnitt ab und bringen Sie ihn bitte zu jeder der folgenden Lernsitzen mit.

© 2003 · Kristin Hildebrandt · IPN

## B.2 Nachtestfragebogen



### 2. Fragebogen

Datum

Benutzername C1

Der Benutzername dient der eindeutigen Zuordnung der Fragebögen zu den Lernprotokollen und der Fragebögen zueinander bei gleichzeitiger Wahrung der Anonymität.

Ihren Benutzernamen erstellen Sie wie folgt:

1. Tragen Sie in das erste Kästchen den **Anfangsbuchstaben des Vornamens Ihrer Mutter** ein.
2. Tragen Sie in das zweite Kästchen den **Anfangsbuchstaben des Vornamens Ihres Vaters** ein.
3. Tragen Sie in die hinteren vier Kästchen den **Geburtstag (TTMM) Ihrer Mutter** ein.

#### **Achten Sie bei der Bearbeitung der Fragen bitte auf Folgendes:**

##### **im Teil 1:**

Bitte setzen Sie nur **ein Kreuz pro Frage** in ein Kästchen. Wenn Sie ein Kreuz zwischen zwei Kästchen einfügen, wird die Antwort für uns wertlos.

Bitte versuchen Sie auf alle Fragen zu antworten. Für uns ist jede Ihrer Antworten wichtig.

##### **im Teil 2:**

Bei den Ankreuzfragen ist immer **nur eine Antwort richtig!**

Bitte versuchen Sie auf alle Fragen zu antworten. Geben Sie bitte auch eine Antwort, wenn Sie sich nicht sicher sind. Der Fragebogen wird nicht bewertet. Für uns ist jede Ihrer Antworten wichtig.

**Viel Spaß bei der Bearbeitung.**

## Teil 1

Wie gefiel Ihnen die äußere Gestaltung (Design) der Lernsoftware?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie gelungen fanden Sie die Strukturierung der Lerninhalte?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie gelungen fanden Sie die Farbgestaltung der Lernsoftware?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie gut kamen Sie mit der Navigation innerhalb der Lernsoftware zurecht?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie gefiel Ihnen das Aussehen der Texte?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie häufig sind Sie nicht an einen Punkt innerhalb der Lernsoftware gelangt zu dem Sie wollten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	nie				sehr oft
Wie gefiel Ihnen die Bildschirmaufteilung der Lernsoftware?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie gelungen fanden Sie die Gestaltung der Abbildungen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr
Wie oft hatten Sie das Gefühl nicht mehr zu wissen wo Sie sich innerhalb der Lernsoftware befinden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	nie				sehr oft
Wie oft haben Sie schon vorher mit Flussdiagrammen gearbeitet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	nie				sehr oft
Wie oft haben Sie schon vorher mit Wirkungsdiagrammen gearbeitet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	nie				sehr oft
Wie sehr haben Ihnen die Flussdiagramme und Wirkungsdiagramme geholfen die Inhalte besser zu verstehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				sehr

Was gefiel Ihnen an der Lernsoftware gut?

---

---

---

Was fanden Sie an der Lernsoftware schlecht?

---

---

---



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
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
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
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
Fühlten Sie sich durch die Informationsmenge des Lernprogramms geistig stark belastet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht				extrem belastet
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
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
Waren die Texte 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
Wie stark fühlten Sie sich durch die Inhalte des Lernprogramms geistig gefordert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	gar nicht		genau richtig		überfordert
Waren die Aufgaben 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
Fiel Ihnen die Bedienung der Lernsoftware eher leicht oder eher schwer?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	sehr leicht				sehr schwer
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
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
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
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

## Teil 2

1. Zur Zeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Der Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?

---

---

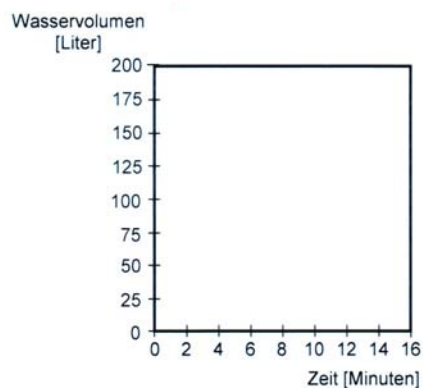
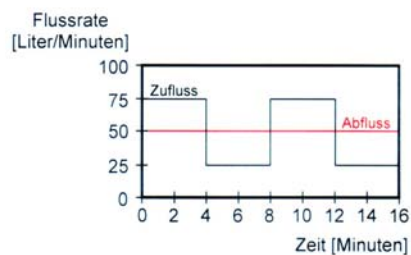
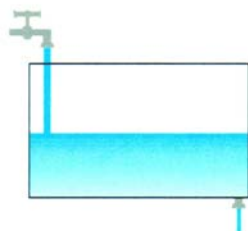
---

---

---

---

2. Betrachten Sie die unten dargestellte Wasserwanne. Wasser fließt mit einer bestimmten Zuflussrate ein und mit einer anderen Flussrate über einen Abfluss aus. Der Graph zeigt das hypothetische Verhalten des Zuflusses (schwarze Linie) und des Abflusses (rote Linie). Verwenden Sie diese Informationen, um in den zweiten Graphen das Wasservolumen in der Wasserwanne einzuzichnen. Nehmen Sie dazu an, dass das Wasservolumen in der Wanne zu Beginn (zum Zeitpunkt 0) 100 Liter beträgt.



3. Die unten stehende Tabelle zeigt, wie viele Fahrräder auf dem Schulhof im Laufe eines Tages ankommen beziehungsweise abfahren.

Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder	Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder
05:00 – 06:00	0	0	14:00 – 15:00	24	48
06:00 – 07:00	11	1	15:00 – 16:00	15	59
07:00 – 08:00	44	2	16:00 – 17:00	10	98
08:00 – 09:00	92	11	17:00 – 18:00	16	35
09:00 – 10:00	53	17	18:00 – 19:00	9	22
10:00 – 11:00	42	12	19:00 – 20:00	4	8
11:00 – 12:00	37	25	20:00 – 21:00	3	5
12:00 – 13:00	24	31	21:00 – 22:00	1	2
13:00 – 14:00	47	55	22:00 – 23:00	0	0

Können Sie aus der Tabelle ermitteln, zu welcher Stunde die meisten Fahrräder auf dem Schulhof stehen?

- Ja, mit folgender Methode:

---



---



---



---

In der Stunde von \_\_\_\_ bis \_\_\_\_ Uhr stehen die meisten Fahrräder auf dem Schulhof.

- Nein, weil ...

---



---



---



---

Können Sie aus der Tabelle entnehmen, in welcher Stunde die meisten Fahrräder vom Schulhof fahren?

- Ja, mit folgender Methode:

---



---



---



---

In der Stunde von \_\_\_\_ bis \_\_\_\_ Uhr fahren die meisten Fahrräder vom Schulhof.

- Nein, weil ...

---



---



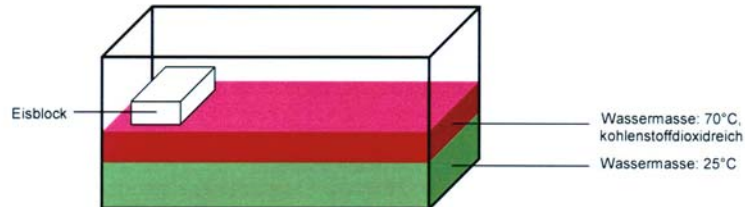
---



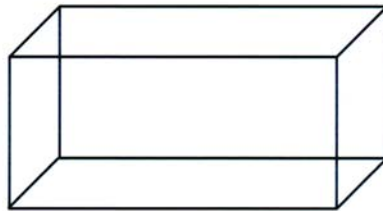
---



4. Unterschiede in der Dichte von Wassermassen führen bei geringen turbulenten Durchmischungen durch Wind oder Wellen zu Schichtungen der Gewässer. In eine Glaswanne wurden 3 Liter Leitungswasser mit einer Temperatur von 25°C gefüllt. Dann wurden 1,5 Liter Leitungswasser auf 70°C erhitzt und vorsichtig in die Glaswanne gefüllt. Es kommt zu einer Schichtung der Wassermassen. Beide Wassermassen wurden zu Beginn des Versuchs mit einer Indikatorlösung versetzt. Zudem wurde beiden Wassermassen Salzsäure bis zum Umschlagspunkt des Indikators nach graugrün hinzugefügt. Mit Hilfe einer Fritte wird für etwa 30 Sekunden Kohlenstoffdioxid in die obere Wasserschicht geleitet, bis sich diese deutlich violett färbt.



Was geschieht unmittelbar nachdem ein Eisblock auf die Wasseroberfläche gelegt wird? Zeichnen Sie Ihre Lösung in die unten stehende Abbildung ein.



Erläutern Sie Ihr Zeichnung.

---



---



---



---

5. Zur Zeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Verwitterung von Silikatgesteinen haben und welche Kohlenstoffflüsse sind mit der Verwitterung von Silikatgestein verbunden? Nennen Sie die relevanten Wirkungsbeziehungen und Stoffflüsse.

---



---



---



---



---



---

6. Nennen Sie Prozesse, Kohlenstoffflüsse und Kohlenstoffspeicher, die den langfristigen Kohlenstoffkreislauf kennzeichnen.

---

---

---

---

---

---

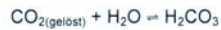
---

---

---

---

7. Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) reagiert mit Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) nach folgenden Gleichgewichtsreaktionen ( $\text{H}_2\text{CO}_3$  Kohlensäure,  $\text{HCO}_3^-$  Hydrogencarbonat-Ionen,  $\text{H}_3\text{O}^+$  Hydronium-Ionen,  $\text{CO}_3^{2-}$  Carbonat-Ionen):



Leitet man Kohlenstoffdioxid nicht in Wasser sondern in Natronlauge ( $\text{NaOH}$ ) ein, löst sich ...

- mehr Kohlenstoffdioxid.
- weniger Kohlenstoffdioxid.
- genauso viel Kohlenstoffdioxid.
- gar kein Kohlenstoffdioxid.

8. Welche der folgenden Aussagen ist nicht richtig?

- Wasser mit einem Salzgehalt von 35‰ hat eine höhere Dichte als Wasser mit einem Salzgehalt von 34‰.
- Eis hat eine höhere Dichte als 4°C warmes Wasser.
- Wasser mit einer Temperatur von 4°C hat eine höhere Dichte als 10°C.
- Mit steigendem hydrostatischen Druck nimmt die Dichte des Wassers zu.

9. Als Diffusion bezeichnet man ...

- den Transport von Teilchen durch eine Biomembran mit Hilfe von Trägerproteinen (Carrier).
- die durch Eigenbewegung von Teilchen erfolgende gleichmäßige Verteilung der Teilchen im Raum.
- den Ausgleichsprozess von Konzentrationsunterschieden in flüssigen Stoffen.
- den Transport von Teilchen gegen ihr Konzentrationsgefälle.

10. Welche der folgenden Aussagen trifft für die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zu?
- Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser besser als in kälterem.
  - Kohlenstoffdioxid löst sich in kälterem Wasser besser als in wärmerem.
  - Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser genau so stark wie in kälterem.
  - Kohlenstoffdioxid löst sich überhaupt nicht in Wasser.
11. Bei der Verwitterung von Kalksteinen (besteht überwiegend aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ )) ...
- entstehen Hydrogencarbonat-Ionen.
  - wird Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in die Atmosphäre freigesetzt.
  - reagieren Carbonatminerale mit Silikatmineralen.
  - wird Kohlenstoff in der Lithosphäre gespeichert.
12. Welche der folgenden Aussagen trifft nicht zu?
- Stoffflüsse sind absolute Änderungen der Größe eines Stoffspeichers.
  - Stoffflüsse stellen den gerichteten Transport spezifischer Stoffe oder ihrer chemischen Verbindungen von einem Stoffspeicher in einen anderen dar.
  - Stoffflüsse sind relative Änderungen der Größe eines Stoffspeichers pro Zeiteinheit.
  - Stoffflüsse sind zumeist mit einer Änderung der chemischen Bindungsform oder des Aggregatzustandes verbunden.
13. Welche der folgenden Aussagen trifft nicht zu?
- Ein Regelkreis ist ein Gefüge aus Wirkungsbeziehungen.
  - Bei einem Regelkreis steht jedes Systemelement in negativer Korrelation zu sich selbst.
  - Durch einen Regelkreis stellt sich im System ein Gleichgewichtszustand ein.
  - Ein Regelkreis kennzeichnet Systeme bei denen eine Systemgröße gefördert wird während ein andere gehemmt wird.

**Toll, Sie haben es geschafft.  
Danke, dass Sie mitgemacht haben!**

## Anhang C Testinstrumente

### C.1 Vorwissenstest

Der Vorwissenstest umfasst 18 Items. In Anhang B.1 auf Seite 323 ff. sind die Items in Form des originalen Vortestfragebogens, der von den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt wurde, dargestellt. Zunächst werden die sieben Items mit Antwortvorgaben vorgestellt. Sie zeichnen sich durch ein Single-Choice-Format aus. Je Frage sind vier Antworten vorgegeben. Die richtige Antwort ist kursiv gesetzt. Wird ein Item richtig beantwortet, wird es mit 1 („richtig“) codiert. Andernfalls wird es mit 0 („falsch“) codiert.

**Item 1 – vwfkt\_1 (Vortest – Teil 2/Frage 1)** Die Stoffe A und B reagieren zu C und D. Die Stoffe C und D können wieder zu A und B rückreagieren. Die Gesamtreaktion lautet somit:  $A + B \rightleftharpoons C + D$ . Das Reaktionssystem befindet sich im chemischen Gleichgewicht, wenn...

- (a) die Konzentration der Anfangsstoffe gleich der Konzentration der Endstoffe ist.
- (b) *die Konzentration der Anfangs- und Endstoffe konstant bleiben.*
- (c) die Hinreaktion genauso viel Energie freisetzt wie die Rückreaktion.
- (d) die Hinreaktion und Rückreaktionen nicht mehr ablaufen.

**Item 2 – vwfkt\_2 (Vortest – Teil 2/Frage 2)** Um elementaren Kohlenstoff handelt es sich bei...

- (a) Kohle.
- (b) Erdöl und Erdgas.
- (c) *Diamant und Graphit.*
- (d) Carbonaten.

**Item 4 – vwfkt\_4 (Vortest – Teil 2/Frage 5)** Was versteht man unter einem Oxidationsmittel?

- (a) *Elektronenakzeptor*
- (b) Elektronendonator
- (c) Protonenakzeptor
- (d) Protonendonator

**Item 5 – vwfkt\_5 (Vortest – Teil 2/Frage 7)** Die Zellatmung ist...

- (a) ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in organische Verbindungen eingebaut wird.
- (b) ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus anorganischen Verbindungen gebildet wird.
- (c) *ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus organischen Verbindungen gebildet wird.*
- (d) ein physiologischer Vorgang, bei dem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in anorganische Verbindungen eingebaut wird.

**Item 6 – vwfkt\_6 (Vortest – Teil 2/Frage 8)** Erdöl entsteht überwiegend aus...

- (a) *abgestorbenen, mikroskopisch kleinen Algen.*
- (b) Kalkschalen von Meeresorganismen.
- (c) abgestorbenen Landpflanzen.
- (d) abgestorbenen Bakterien und Pilzen.

**Item 13 – vwfkt\_13 (Vortest – Teil 2/Frage 17)** Destruenten...

- (a) *sind Organismen, die abgestorbene organische Substanz zersetzen.*
- (b) sind Organismen, die sich von im Boden lebenden Organismen ernähren.
- (c) sind Organismen, die anorganische Substanz in organische umwandeln.
- (d) bilden das Anfangsglied der Nahrungskette.

**Item 14 – vwfkt\_14 (Vortest – Teil 2/Frage 18)** Welche der folgenden Aussagen zur Nahrungskette ist richtig?

- (a) Die im Körper aus der Nahrung aufgebaute organische Substanz enthält genauso viel Energie, wie in der Nahrung enthalten war.
- (b) Die Biomasse nimmt beim Durchgang durch die Nahrungskette, von den Produzenten zu den Konsumenten höherer Ordnung zu.
- (c) Vor allem leicht abbaubare Schadstoffe werden über die Nahrungskette angereichert.
- (d) *Die Nahrungsproduktion ist letztlich vom Sonnenlicht abhängig.*

Im Folgenden werden die elf Vorwissensitems mit offenem Antwortformat dargestellt. Sie basieren auf zwei Fragen aus dem Vortest. Diese erfordern von den Schülerinnen und Schülern das Erstellen eines Lösungstextes bzw. einer Zeichnung. Für die Verwendung bestimmter Strukturen und Inhalte werden Punkte vergeben. Die Antwort muss korrekt sein, aber der hier vorgegeben nicht entsprechen. Jedes Item wird mit einem Punkt bewertet.

**(Vortest – Teil 2/Frage 4)** Wie lautet die Bruttogleichung der Fotosynthese?

**Item 3 – vwftk\_3**  $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$  (1 Punkt)

**(Vortest – Teil 2/Frage 14)** Grüne Pflanzen nehmen bei der Fotosynthese Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus der Atmosphäre auf und bauen dieses in organische Verbindungen ein. Bei der Zellatmung werden organische Verbindungen abgebaut.  $\text{CO}_2$  wird wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die Fotosyntheseleistung kann bei ausreichender Lichtintensität und genügend Wasser durch Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft steigen.

Kennzeichnen sie die im Text beschriebenen Beziehungen zwischen den Kohlenstoffspeichern Atmosphäre und Biosphäre. Differenzieren Sie zwischen den Stoffflüssen und den Wirkungsbeziehungen.

**Item 15 – vvwst\_1** Stofffluss:  $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]  $\xrightarrow{\text{Fotosynthese}}$  org. C [Biosphäre]  
(1 Punkt)

**Item 16 – vvwst\_2** Stofffluss: org. C [Biosphäre]  $\xrightarrow{\text{Atmung}}$   $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]  
(1 Punkt)

**Item 17 – vvwst\_3** Wirkungsbeziehung:  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre  $\xrightarrow{+}$  Biomasse  
(1 Punkt)

**Item 18 – vvwst\_4** Wirkungsbeziehung: Biomasse  $\xrightarrow{-}$   $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre  
(1 Punkt)

**(Vortest – Teil 2/Frage 15)** Nennen Sie biochemische und geochemische Prozesse, die Kohlenstoff oder seine chemischen Verbindungen auf der Erde umsetzen.

biochemische Prozesse      Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung biotischer (belebter) Systeme abläuft.

geochemische Prozesse      Prozesse, deren Chemismus unter Beteiligung abiotischer (unbelebter) Systeme abläuft.

- Item 7 – vwfkt\_7** Atmung (1 Punkt)
- Item 8 – vwfkt\_8** Fotosynthese (1 Punkt)
- Item 9 – vwfkt\_9** Mineralisierung (1 Punkt)
- Item 10 – vwfkt\_10** Verwitterung oder Sedimentation (1 Punkt)
- Item 11 – vwfkt\_11** Metamorphose, Diagenese oder Vulkanismus (1 Punkt)
- Item 12 – vwfkt\_12** Verbrennung (1 Punkt)

## C.2 Tests zur Erhebung des Lernzuwachses

### C.2.1 Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg*

Der Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *Lernerfolg* umfasst 13 Items. Diese werden aus Fragen generiert, die sowohl im Vortest als auch im Nachtest gestellt werden. In Anhang B.1 auf Seite 323 ff. sind die Items in Form des originalen Vortestfragebogens, in Anhang B.2 auf Seite 332 ff. in Form des originalen Nachtestfragebogens dargestellt. Zunächst werden die fünf Items mit Antwortvorgaben vorgestellt. Sie zeichnen sich durch ein Single-Choice-Format aus. Je Frage sind vier Antworten vorgegeben. Die richtige Antwort ist kursiv gesetzt. Wird ein Item richtig beantwortet, wird es mit 1 („richtig“) codiert. Andernfalls wird es mit 0 („falsch“) codiert.

**Item 19 – leff\_1; leff\_1.1 (Vortest – Teil 2/Frage 10; Nachtest – Teil 2/Frage 8)** Welche der folgenden Aussagen ist nicht richtig?

- (a) Wasser mit einem Salzgehalt von 35 ‰ hat eine höhere Dichte als Wasser mit einem Salzgehalt von 34 ‰.
- (b) *Eis hat eine höhere Dichte als 4° C warmes Wasser.*
- (c) Wasser mit einer Temperatur von 4° C hat eine höhere Dichte als 10° C.
- (d) Mit steigendem hydrostatischem Druck nimmt die Dichte des Wassers zu.

**Item 20 – leff\_2; leff\_2.1 (Vortest – Teil 2/Frage 11; Nachtest – Teil 2/Frage 9)** Als Diffusion bezeichnet man...

- (a) den Transport von Teilchen durch eine Biomembran mit Hilfe von Trägerproteinen (Carrier).
- (b) *die durch Eigenbewegung von Teilchen erfolgende gleichmäßige Verteilung der Teilchen im Raum*
- (c) den Ausgleichsprozess von Konzentrationsunterschieden in flüssigen Stoffen.
- (d) den Transport von Teilchen gegen ihr Konzentrationsgefälle.



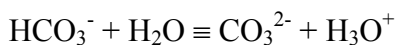
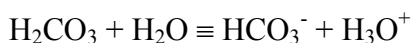
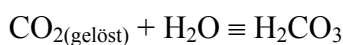
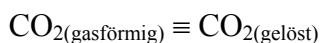
**Item 21 – leff\_3; leff\_3.1 (Vortest – Teil 2/Frage 13; Nachtest – Teil 2/Frage 10)** Welche der folgenden Aussagen trifft für die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in Wasser (H<sub>2</sub>O) zu?

- (a) Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser besser als in kälterem.
- (b) *Kohlenstoffdioxid löst sich in kälterem Wasser besser als in wärmerem.*
- (c) Kohlenstoffdioxid löst sich in wärmerem Wasser genau so stark wie in kälterem.
- (d) Kohlenstoffdioxid löst sich überhaupt nicht in Wasser.

**Item 22 – leff\_4; leff\_4.1 (Vortest – Teil 2/Frage 16; Nachtest – Teil 2/Frage 11)** Bei der Verwitterung von Kalksteinen (besteht überwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>))...

- (a) *entstehen Hydrogencarbonat-Ionen.*
- (b) wird Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre freigesetzt.
- (c) reagieren Carbonatminerale mit Silikatmineralen.
- (d) wird Kohlenstoff in der Lithosphäre gespeichert.

**Item 23 – lefv\_1; lefv\_1.1 (Vortest – Teil 2/Frage 3; Nachtest – Teil 2/Frage 7)** Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) reagiert mit Wasser (H<sub>2</sub>O) nach folgenden Gleichgewichtsreaktionen (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Kohlensäure, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> Hydrogencarbonat-Ionen, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> Hydronium-Ionen, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> Carbonat-Ionen):

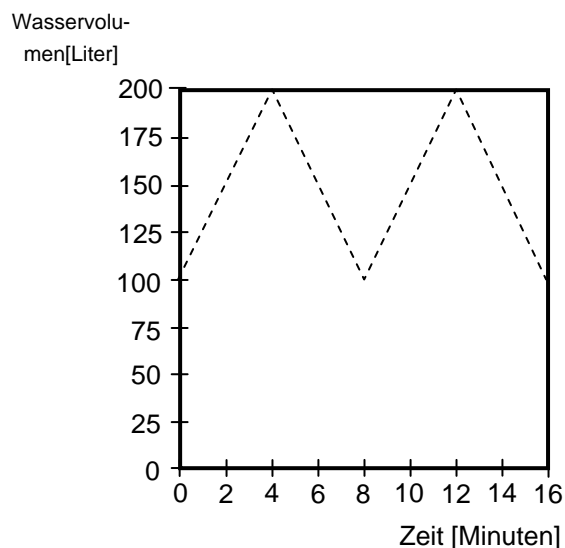
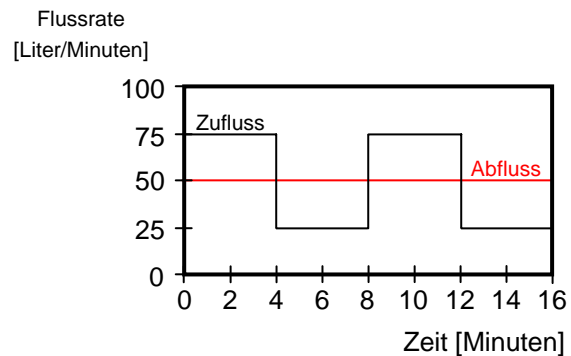
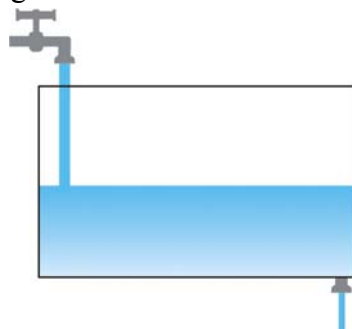


Leitet man Kohlenstoffdioxid nicht in Wasser, sondern in Natronlauge (NaOH) ein, löst sich...

- (a) *mehr Kohlenstoffdioxid.*
- (b) weniger Kohlenstoffdioxid.
- (c) genauso viel Kohlenstoffdioxid.
- (d) gar kein Kohlenstoffdioxid.

Im Folgenden werden die acht Lernerfolgiteme mit offenem Antwortformat dargestellt. Sie basieren auf drei Fragen aus dem Vor- bzw. Nachttest. Diese erfordern von den Schülerinnen und Schülern das Erstellen eines Lösungstextes bzw. einer Zeichnung. Für die Verwendung bestimmter Strukturen und Inhalte werden Punkte vergeben. Die Antwort muss korrekt sein, aber der hier vorgegebenen nicht entsprechen. Jedes Item wird mit einem Punkt bewertet.

**(Vortest – Teil 2/Frage 6; Nachttest – Teil 2/Frage 2)** Betrachten Sie die unten dargestellte Wasserwanne. Wasser fließt mit einer bestimmten Zuflussrate ein und mit einer anderen Flussrate über einen Abfluss aus. Der Graph zeigt das hypothetische Verhalten des Zuflusses (schwarze Linie) und des Abflusses (rote Linie). Verwenden Sie diese Informationen, um in den zweiten Graphen das Wasservolumen in der Wasserwanne einzuzeichnen. Nehmen Sie dazu an, dass das Wasservolumen in der Wanne zu Beginn (zum Zeitpunkt 0) 100 Liter beträgt.



**Item 24 – lefv\_2; lefv\_2.1** richtiger Linienverlauf (1 Punkt)

**Item 25 – lefv\_3; lefv\_3.1** richtige Lage der Linie (1 Punkt)

(Vortest – Teil 2/Frage 9; Nachtest – Teil 2/Frage 3) Die unten stehende Tabelle zeigt, wie viele Fahrräder auf dem Schulhof im Laufe eines Tages ankommen beziehungsweise abfahren.

Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder	Stunde	Anzahl der ankommenden Fahrräder	Anzahl der abfahrenden Fahrräder
05:00 – 06:00	0	0	14:00 – 15:00	24	48
06:00 – 07:00	11	1	15:00 – 16:00	15	59
07:00 – 08:00	44	2	16:00 – 17:00	10	98
08:00 – 09:00	92	11	17:00 – 18:00	16	35
09:00 – 10:00	53	17	18:00 – 19:00	9	22
10:00 – 11:00	42	12	19:00 – 20:00	4	8
11:00 – 12:00	37	25	20:00 – 21:00	3	5
12:00 – 13:00	24	31	21:00 – 22:00	1	2
13:00 – 14:00	47	55	22:00 – 23:00	0	0

Können Sie aus der Tabelle ermitteln, zu welcher Stunde die meisten Fahrräder auf dem Schulhof stehen?

Ja, mit folgender Methode: *Ab 12:00 Uhr ist die Anzahl der abfahrenden Räder größer als die Anzahl der ankommenden Räder. Das ändert sich bis 23:00 Uhr nicht mehr. In der Stunde von 11:00 bis 12:00 Uhr stehen also die meisten Fahrräder auf dem Schulhof.*

Nein, weil... /

**Item 26 – lefv\_4; lefv\_4.1** richtige Methode (1 Punkt); alleinige Rechnung, d. h. Addition ankommender Räder und Subtraktion abfahrender Räder (0 Punkte)

**Item 27 – lefv\_5; lefv\_5.1** richtige Stunde (1 Punkt)

Können Sie aus der Tabelle entnehmen, in welcher Stunde die meisten Fahrräder vom Schulhof fahren?

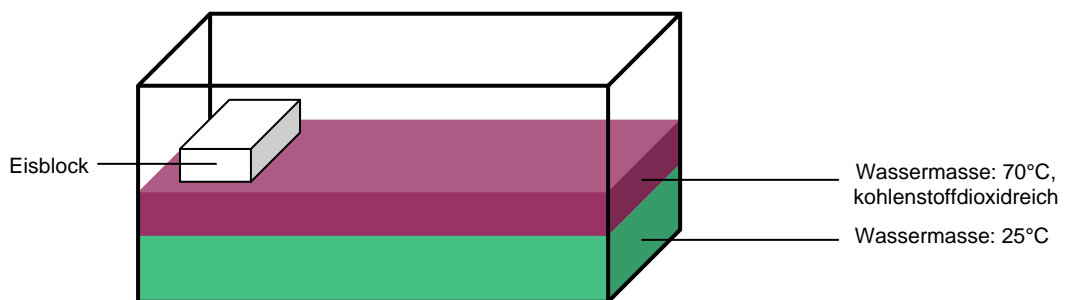
Ja, mit folgender Methode: *Die Stunde, in der die Anzahl der abfahrenden Räder maximal ist, kann direkt aus der Tabelle abgelesen werden. In der Stunde von 16:00 bis 17:00 Uhr fahren die meisten Fahrräder vom Schulhof. Es sind 98 Räder.*

Nein, weil... /

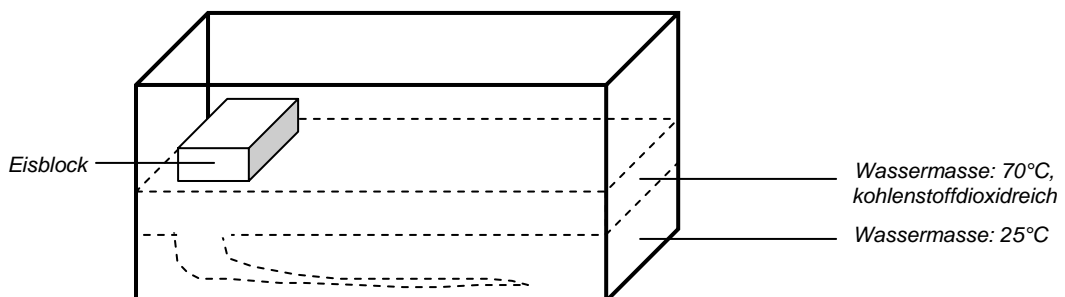
**Item 28 – lefv\_6; lefv\_6.1** richtige Methode (1 Punkt)

**Item 29 – lefv\_7; lefv\_7.1** richtige Stunde (1 Punkt)

**(Vortest – Teil 2/Frage 12; Nachtest – Teil 2/Frage 4)** Unterschiede in der Dichte von Wassermassen führen bei geringen turbulenten Durchmischungen durch Wind oder Wellen zu Schichtungen der Gewässer. In eine Glaswanne wurden 3 Liter Leitungswasser mit einer Temperatur von 25° C gefüllt. Dann wurden 1,5 Liter Leitungswasser auf 70° C erhitzt und vorsichtig in die Glaswanne gefüllt. Es kommt zu einer Schichtung der Wassermassen. Beide Wassermassen wurden zu Beginn des Versuchs mit einer Indikatorlösung versetzt. Zudem wurde beiden Wassermassen Salzsäure bis zum Umschlagspunkt des Indikators nach graugrün hinzugefügt. Mit Hilfe einer Fritte wird für etwa 30 Sekunden Kohlenstoffdioxid in die obere Wasserschicht geleitet, bis sich diese deutlich violett färbt.



Was geschieht unmittelbar nachdem ein Eisblock auf die Wasseroberfläche gelegt wird? Tragen Sie Ihre Lösung in die unten stehende Abbildung ein.



*Das Oberflächenwasser kühlt sich auf der linken Seite des Beckens stark ab. Aufgrund der damit verbundenen Dichtezunahme sinkt es ab und erzeugt eine Tiefenströmung.*

**Item 30 – lefv\_8; lefv\_8.1** Absinken der abgekühlten Wassermassen auf der linken Seite des Beckens (1 Punkt)

**Item 31 – lefv\_9; lefv\_9.1** Begründung der Tiefenzirkulationsbildung (1 Punkt)

### C.2.2 Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde*

Der Test zur Erhebung des Lernzuwachses in der Kategorie *System Erde* umfasst 13 Items. Diese werden aus Fragen generiert, die ausschließlich im Nachtest gestellt werden. In Anhang B.2 auf Seite 332 ff. sind die Items in Form des originalen Nachtestfragebogens dargestellt. Zunächst werden die zwei Items mit Antwortvorgaben vorgestellt. Sie zeichnen sich durch ein Single-Choice-Format aus. Je Frage sind vier Antworten vorgegeben. Die richtige Antwort ist kursiv gesetzt. Wird ein Item richtig beantwortet, wird es mit 1 („richtig“) codiert. Andernfalls wird es mit 0 („falsch“) codiert.

**Item 43 – ntsys\_12 (Nachtest – Teil 2/Frage 12)** Welche der folgenden Aussagen trifft nicht zu?

- (a) Stoffflüsse sind absolute Änderungen der Größe eines Stoffspeichers.
- (b) Stoffflüsse stellen den gerichteten Transport spezifischer Stoffe oder ihrer chemischen Verbindungen von einem Stoffspeicher in einen anderen dar.
- (c) *Stoffflüsse sind relative Änderungen der Größe eines Stoffspeichers pro Zeiteinheit.*
- (d) Stoffflüsse sind zumeist mit einer Änderung der chemischen Bindungsform oder des Aggregatzustandes verbunden.

**Item 44 – ntsys\_13 (Nachtest – Teil 2/Frage 13)** Welche der folgenden Aussagen trifft nicht zu?

- (a) Ein Regelkreis ist ein Gefüge aus Wirkungsbeziehungen.
- (b) Bei einem Regelkreis steht jedes Systemelement in negativer Korrelation zu sich selbst.
- (c) Durch einen Regelkreis stellt sich im System ein Gleichgewichtszustand ein.
- (d) *Ein Regelkreis kennzeichnet Systeme bei denen eine Systemgröße gefördert wird während ein andere gehemmt wird.*

Im Folgenden werden die elf Items mit offenem Antwortformat dargestellt. Sie basieren auf drei Fragen aus dem Nachtest. Diese erfordern von den Schülerinnen und Schülern das Erstellen eines Lösungstextes bzw. einer Zeichnung. Für die Verwendung bestimmter Strukturen und Inhalte werden Punkte vergeben. Die Antwort muss korrekt sein, aber der hier vorgegebenen nicht entsprechen. Jedes Item wird mit einem Punkt bewertet.

**(Nachtest – Teil 2/Frage 1)** Zurzeit werden durch menschliche Aktivität etwa 6,3 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich aus fossilen Rohstoffen in die Atmosphäre freigesetzt. Die Kohlenstoffdioxidemissionen stammen aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle und aus der Zementproduktion. Wo verbleibt der Kohlenstoff, der durch Einwirkungen des Menschen an die Atmosphäre abgegeben wird?

*Die Kohlenstoffspeicher „Ozean“ und „terrestrische Biosphäre“ wirken zurzeit in Bezug auf den Kohlenstoffspeicher „Atmosphäre“ als Kohlenstoffquelle. Pro Jahr werden 1,7 Gigatonnen des durch menschliche Aktivität freigesetzten Kohlenstoffs vom Ozean und 1,4 Gigatonnen von der Landvegetation aufgenommen.*

**Item 32 – ntsys\_1** Ozean wirkt als Kohlenstoffsенke (1 Punkt)

**Item 33 – ntsys\_2** terrestrische Biosphäre wirkt als Kohlenstoffsенke (1 Punkt)

**Item 34 – ntsys\_3** Kohlenstoffaufnahme des Ozeans: 1,7 GtC/Jahr (1 Punkt)

**Item 35 – ntsys\_4** Kohlenstoffaufnahme der terrestrische Biosphäre: 1,4 GtC/Jahr (1 Punkt)

**(Nachtest – Teil 2/Frage 5)** Zurzeit steigt der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO<sub>2</sub>-Gehalt) der Atmosphäre an. Dieser Anstieg führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Die globale Temperatur nimmt aus diesem Grund vermutlich zu. Welchen Einfluss könnten diese Phänomene auf die Verwitterung von Silikatgesteinen haben und welche Kohlenstoffflüsse sind mit der Verwitterung von Silikatgestein verbunden? Nennen Sie die relevanten Wirkungsbeziehungen und Stoffflüsse.

*Eine verminderte/erhöhte Verwitterungsrate hätte eine Erhöhung/Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre zur Folge. Eine Erhöhung/Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre hätte eine Erhöhung/Verminderung der Temperatur und damit eine Erhöhung/Verminderung der Verwitterungsrate von Silikatgesteinen zur Folge. Die Wirkungsbeziehungen bilden einen Regelkreis. Diese negative Rückkopplung regelt unter anderem den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre.*

*Durch die chemische Verwitterung von Silikatgesteinen wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre (CO<sub>2</sub>) in die Hydrosphäre (Hydrogencarbonat) überführt.*

**Item 36 – ntsys\_5** Wirkungsbeziehung:  
Verwitterungsrate  $\xrightarrow{-}$  CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre (1 Punkt)

**Item 37 – ntsys\_6** Wirkungsbeziehung:  
CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre  $\xrightarrow{+}$  Temperatur (1 Punkt)

**Item 38 – ntsys\_7** Wirkungsbeziehung:  
Temperatur  $\xrightarrow{+}$  Verwitterungsrate (1 Punkt)

**Item 39 – ntsys\_8** Stofffluss:  
 $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]  $\longrightarrow$   $\text{HCO}_3^-$ -Ionen [Hydrosphäre] (1 Punkt)

(Nachttest – Teil 2/Frage 6) Nennen Sie Prozesse, Kohlenstoffflüsse und Kohlenstoffspeicher, die den langfristigen Kohlenstoffkreislauf kennzeichnen.

**Item 40 – ntsys\_9** Stofffluss:  
 $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]  $\xrightarrow{\text{Silikatverwitterung}}$   $\text{HCO}_3^-$ -Ionen [Hydrosphäre]  
(1 Punkt)

**Item 41 – ntsys\_10** Stofffluss:  
 $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]/ $\text{CaCO}_3$  [Lithosphäre]  $\xrightarrow{\text{Carbonatverwitterung}}$   
 $\text{HCO}_3^-$ -Ionen [Hydrosphäre]  
oder  
 $\text{CO}_2$  [Lithosphäre]  $\xrightarrow{\text{Ausgasung / Vulkanismus / Verbrennung}}$   
 $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]/ $\text{CO}_2$  [Hydrosphäre]  
oder  
[Lithosphäre]  $\xrightarrow{\text{Gesteinsmetamorphose / Diagenese}}$   
 $\text{CO}_2$  [Atmosphäre]/ $\text{CO}_2$  [Hydrosphäre]  
(1 Punkt)

**Item 42 – ntsys\_11** Stofffluss:  
[Biosphäre]/[Hydrosphäre]  $\xrightarrow{\text{Carbonatbildung / Sedimentation}}$   
[Lithosphäre]  
(1 Punkt)

### C.3 Tests zur Erhebung kognitiver und motivationaler Kontrollvariablen

#### C.3.1 Test zur Erhebung des Computerwissens und Computerinteresses

Zur Erhebung des Computerwissens und Computerinteresse werden, angelehnt an Nerdel (2003), zwei Skalen von Urhahne (2002) verwendet. Sie werden im Rahmen des Vortests eingesetzt. Die Skalen umfassen jeweils vier Items. Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“. Umgekehrt gepolte Items sind in Tab. A - 1 mit „(-)“ gekennzeichnet.

Itemname	Position des Items im Test	Item
CompWis_1	Vortest – Teil 1/Frage 2	Ich habe schon oft mit Lernprogrammen gearbeitet.
CompWis_2	Vortest – Teil 1/Frage 12	Ich kenne mich mit Computern sehr gut aus.
CompWis_3	Vortest – Teil 1/Frage 21	Ich arbeite sehr häufig mit dem Computer.
CompWis_4	Vortest – Teil 1/Frage 23	Ich weiß eine ganze Menge über Computer.
CompInt_1	Vortest – Teil 1/Frage 3	Das Lernen am Computer habe ich noch nie gemocht. (-)
CompInt_2	Vortest – Teil 1/Frage 6	Das Lernen am Computer macht mir viel Spaß.
CompInt_3	Vortest – Teil 1/Frage 8	Das Lernen am Computer finde ich anregend und spannend.
CompInt_4	Vortest – Teil 1/Frage 15	Das Lernen am Computer finde ich nicht gerade interessant. (-)

**Tab. A - 1:** Items zur Erhebung des Computerwissens und Computerinteresses (CompWis – Computerwissen; CompInt – Computerinteresse).



### C.3.2 Test zur Erhebung der Lernpräferenz

Der Test zur Erhebung der Lernpräferenz besteht aus 12 Items. Er ist, angelehnt an Nerdel (2003) und Kramer (2005), dem *Individual Difference Questionnaire* (IDQ) von Paivio und Harshman (1983) entnommen. Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“. Umgekehrt gepolte Items sind in Tab. A - 2 mit „(-)“ gekennzeichnet.

Itemname	Position des Items im Test	Item
VisVorst_1	Vortest – Teil 1/Frage 4	Ich benutze oft bildliche Vorstellungen, um mir Dinge zu merken.
VisVorst_2	Vortest – Teil 1/Frage 14	Ich denke oft in Bildern.
VisVorst_3	Vortest – Teil 1/Frage 16	Wenn ich mich an eine Szene erinnere, denke ich eher in Worten als in Bildern. (-)
VisVorst_4	Vortest – Teil 1/Frage 17	Ich finde es schwierig, mir etwas bildlich vorzustellen. (-)
VisProb_1	Vortest – Teil 1/Frage 7	Um eine Aufgabe zu lösen, stelle ich mir ihren Inhalt bildlich vor.
VisProb_2	Vortest – Teil 1/Frage 20	Um einen Prozess zu verstehen, stelle ich mir die einzelnen Schritte bildhaft vor.
VerbAusdr_1	Vortest – Teil 1/Frage 5	Ich habe oft Ideen, die ich nur mit Schwierigkeiten ausdrücken kann. (-)
VerbAusdr_2	Vortest – Teil 1/Frage 10	Ich kann mich sprachlich gut ausdrücken.
VerbAusdr_3	Vortest – Teil 1/Frage 18	Ich kann meine Gedanken gut in Worte fassen.
VerbAusdr_4	Vortest – Teil 1/Frage 22	Ich habe häufig Schwierigkeiten, anderen Leuten Dinge mit Worten zu erklären. (-)
VerbLes_1	Vortest – Teil 1/Frage 9	Ich lese sehr langsam. (-)
VerbLes_2	Vortest – Teil 1/Frage 13	Es fällt mir leicht, Texte zu lesen.

**Tab. A - 2:** Items zur Erhebung der Lernpräferenz: VisVorst – *Visuelle Lernpräferenz/Gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen*; VisProb – *Visuelle Lernpräferenz/Benutzung von bildlichen Vorstellungen beim Problemlösen*; VerbAusdr – *Verbale Lernpräferenz/Guter sprachlicher Ausdruck*; VerbLes – *Verbale Lernpräferenz/Selbsteinschätzung von Leseschwierigkeiten*.

### C.3.3 Test zur Erhebung der graphischen Kompetenz

Zur Erhebung der graphischen Kompetenz werden vier Items verwendet. Sie werden im Rahmen des Vortests eingesetzt. Alle Items besitzen eine vierstufige Antwortskala. Sie reicht von „trifft nicht zu“ bis „trifft völlig zu“.

Itemname	Position des Items im Test	Item
GraphKomp_1	Vortest – Teil 1/Frage 1	Graphiken helfen mir beim Merken von Inhalten.
GraphKomp_2	Vortest – Teil 1/Frage 11	Um eine Aufgabe zu lösen, erstelle ich häufig eine Graphik.
GraphKomp_3	Vortest – Teil 1/Frage 19	Es fällt mir leicht Diagramme zu interpretieren.
GraphKomp_4	Vortest – Teil 1/Frage 24	Es fällt mir leicht Graphiken zu erstellen.

**Tab. A - 3:** Items zur Erhebung der graphischen Kompetenz: GraphKomp – *Graphische Kompetenz*.

### C.3.4 Test zur Erhebung der kognitiven Belastung

Zur Erfassung der kognitiven Belastung wird ein nach Nerdel (2003) und Kramer (2005) adaptierter Test verwendet. Er basiert ursprünglich auf einer Skala, die dem Test zur kognitiven Belastung von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala besteht aus vier Subskalen: *Anstrengung* (zwei Items), *Komplexität von Lerninhalt und Lernumgebung* (vier Items), *Geistige Auslastung* (zwei Items) und *Inhaltliches Verständnis* (zwei Items). Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat.

Itemname	Position des Items im Test	Item
Anstr_1	Nachtest – Teil 1/Frage 20	Wie stark mussten Sie sich beim Lernen mit dem Lernprogramm geistig anstrengen? („gar nicht“ bis „extrem“)
Anstr_2	Nachtest – Teil 1/Frage 27	Wie sehr mussten Sie sich bemühen, um die Inhalte des Lernprogramms zu verstehen? („gar nicht“ bis „extrem“)
KomplxLI_1	Nachtest – Teil 1/Frage 17	Waren die Inhalte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex? („viel zu einfach“ bis „viel zu komplex“)
KomplxLU_1	Nachtest – Teil 1/Frage 22	Waren die Texte des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex? („viel zu einfach“ bis „viel zu komplex“)
KomplxLU_2	Nachtest – Teil 1/Frage 24	Waren die Aufgaben des Lernprogramms Ihnen eher zu einfach oder eher zu komplex? („viel zu einfach“ bis „viel zu komplex“)
KomplxLU_3	Nachtest – Teil 1/Frage 25	Fiel Ihnen die Bedienung der Lernsoftware eher leicht oder eher schwer? („sehr leicht“ bis „sehr schwer“)
KogAusl_1	Nachtest – Teil 1/Frage 19	Fühlten Sie sich durch die Informationsmenge des Lernprogramms geistig stark belastet? („gar nicht“ bis „extrem belastet“)
KogAusl_2	Nachtest – Teil 1/Frage 23	Wie stark fühlten Sie sich durch die Inhalte des Lernprogramms geistig gefordert? („gar nicht“ bis „überfordert“)
Verstd_1	Nachtest – Teil 1/Frage 26	Wie häufig blieben die Informationen des Lernprogramms für Sie unverständlich? („gar nicht“ bis „extrem häufig“)
Verstd_2	Nachtest – Teil 1/Frage 28	Wie häufig hatten Sie den Eindruck, dass das Lernprogramm Ihnen zu viele Informationen anbot? („gar nicht“ bis „extrem häufig“)

**Tab. A - 4:** Items zur Erhebung der kognitiven Belastung; Anstr – *Anstrengung*; KomplxLI/-LU – *Komplexität der Lerninhalte/-umgebung*; KogAusl – *Geistige Auslastung*; Verstd – *Inhaltliches Verständnis*.

### C.3.5 Test zur Erhebung der Aufmerksamkeit

Zur Erfassung der Aufmerksamkeit wird ein nach Nerdel (2003) adaptierter Test verwendet. Er basiert ursprünglich auf einer Skala, die dem Test von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala besteht aus zwei Items mit fünfstufigem Antwortformat.

Itemname	Position des Items im Test	Item
Aufm_1	Nachtest – Teil 1/Frage 16	Wie gut konnten Sie sich auf die Inhalte des Lernprogramms konzentrieren? („gar nicht“ bis „sehr gut“)
Aufm_2	Nachtest – Teil 1/Frage 29	Wie aufmerksam waren Sie bei der Bearbeitung des Lernprogramms? („gar nicht“ bis „sehr aufmerksam“)

**Tab. A - 5:** Items zur Erhebung der Aufmerksamkeit: Aufm – *Aufmerksamkeit*.

### C.3.6 Test zur Erhebung des Interesses

Zur Erfassung des situationalen Interesses wird ein nach Nerdel (2003) und Kramer (2005) adaptierter Test verwendet. Er basiert ursprünglich auf einer Skala, die dem Test zur kognitiven Belastung von Urhahne (2002) entnommen ist. Die Skala besteht aus fünf Items. Um den Sinnzusammenhang von Fragen nicht zu verändern musste die Skala in dieser Studie auf drei Items reduziert werden. Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat.

Itemname	Position des Items im Test	Item
SitInt_1	Nachtest – Teil 1/Frage 15	Wie abwechslungsreich und spannend fanden Sie das Lernprogramm? („gar nicht“ bis „sehr“)
SitInt_2	Nachtest – Teil 1/Frage 18	Wie interessant waren die Inhalte des Lernprogramms für Sie? („gar nicht“ bis „sehr“)
SitInt_3	Nachtest – Teil 1/Frage 21	Wie gut hat Ihnen das Lernprogramm gefallen? („gar nicht“ bis „sehr gut“)

**Tab. A - 6:** Items zur Erhebung des Interesses: SitInt – *Situationales Interesse*.

### C.3.7 Test zur Erhebung der Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen

Der Test zur Erhebung der Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen umfasst drei Items mit fünfstufigem Antwortformat.

Itemname	Position des Items im Test	Item
Sysdiagr_1	Nachtest – Teil 1/Frage 10	Haben Sie schon vorher mit Flussdiagrammen gearbeitet? („gar nicht“ bis „sehr oft“)
Sysdiagr_2	Nachtest – Teil 1/Frage 11	Haben Sie schon vorher mit Wirkungsdiagrammen gearbeitet? („gar nicht“ bis „sehr oft“)
Sysdiagr_3	Nachtest – Teil 1/Frage 12	Haben Ihnen die Flussdiagramme und Wirkungsdiagramme geholfen, die Inhalte besser zu verstehen? („gar nicht“ bis „sehr“)

**Tab. A - 7:** Items zur Erhebung der Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen: Sysdiagr – *Systemdiagramme*.

## C.4 Evaluation der Lernumgebung

Die Lernumgebung wird mit Hilfe von neun Items evaluiert. Es werden drei Subskalen verwendet: *Evaluation des Softwaredesigns* (vier Items), *Evaluation der Softwarenavigation* (drei Items) und *Evaluation der Softwarestruktur* (zwei Items). Die ersten beiden Subskalen sind den Evaluationsfragen von Kramer (2005) entnommen. Alle Items besitzen ein fünfstufiges Antwortformat. Umgekehrt gepolte Items sind in Tab. A-8 mit „(-)“ gekennzeichnet.

Itemname	Position des Items im Test	Item
EvalDesign_1	Nachtest – Teil 1/Frage 1	Wie gefiel Ihnen die äußere Gestaltung (Design) der Lernsoftware? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalDesign_2	Nachtest – Teil 1/Frage 3	Wie gelungen fanden Sie die Farbgestaltung der Lernsoftware? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalDesign_3	Nachtest – Teil 1/Frage 5	Wie gefiel Ihnen das Aussehen der Texte? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalDesign_4	Nachtest – Teil 1/Frage 8	Wie gelungen fanden Sie die Gestaltung der Abbildungen? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalStruk_1	Nachtest – Teil 1/Frage 2	Wie gelungen fanden Sie die Strukturierung der Lerninhalte? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalStruk_2	Nachtest – Teil 1/Frage 7	Wie gefiel Ihnen die Bildschirmaufteilung der Lernsoftware? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalNavi_1	Nachtest – Teil 1/Frage 4	Wie gut kamen Sie mit der Navigation innerhalb der Lernsoftware zurecht? („gar nicht“ bis „sehr“)
EvalNavi_2	Nachtest – Teil 1/Frage 6	Wie häufig sind Sie nicht an einen Punkt innerhalb der Lernsoftware gelangt, zu dem Sie wollten? („nie“ bis „sehr oft“) (-)
EvalNavi_3	Nachtest – Teil 1/Frage 9	Wie oft hatten Sie das Gefühl, nicht mehr zu wissen, wo Sie sich innerhalb der Lernsoftware befinden? („nie“ bis „sehr oft“) (-)

**Tab. A - 8:** Items zur Evaluation der Lernumgebung mit fünfstufiger Antwortskala: EvalDesign – *Evaluation des Softwaredesigns*; EvalStruk – *Evaluation der Softwarestruktur*; EvalNavi – *Evaluation der Softwarenavigation*.

Der Evaluationsfragebogen enthält zudem zwei Items mit offenem Antwortformat.

<b>Itemname</b>	<b>Position des Items im Test</b>	<b>Item</b>
EvalLU_1	Nachtest – Teil 1/Frage 13	Was gefiel Ihnen an der Lernsoftware gut?
EvalLU_2	Nachtest – Teil 1/Frage 14	Was fanden Sie an der Lernsoftware schlecht?

**Tab. A - 9:** Items zur Evaluation der Lernumgebung mit offenem Antwortformat: Eval – *Evaluation der Lernumgebung*.



## Anhang D Weitere Ergebnisse

### D.1 Weitere Ergebnisse der LCA für die Kategorie *Lernerfolg*

#### D.1.1 3-Klassen-LCA-Modell

##### D.1.1.1 Einfluss des Vorwissens

Im Folgenden wird der Einfluss des Vorwissens auf die Änderung der Klassenzugehörigkeit untersucht. Während bei den Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen acht in eine höhere Klasse aufsteigen und neun in eine niedrigere Klasse absteigen, steigen bei den Versuchspersonen mit hohem Vorwissen neun auf und zwei ab (siehe Tab. A - 10 auf Seite 361). Somit verbessern sich bei den Lernenden mit geringem Vorwissen etwa 11,9 %, bei denen mit hohem Vorwissen etwa 25,7 %. Bei den Versuchspersonen mit geringem Vorwissen verschlechtern sich etwa 13,4 %, bei denen mit hohem Vorwissen lediglich etwa 5,7 %. Bei den 50 Versuchspersonen mit geringem und den 24 Personen mit hohem Vorwissen, die nach dem Treatment die Klasse nicht wechseln, kann „Lernen“ anhand der Änderung der mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeit näher bestimmt werden (siehe Tab. A - 11 auf Seite 362 und Tab. A - 12 auf Seite 363).

			Nachttest			
			Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	<b>Vortest</b>	Klasse 1	39	4	3	46
		Klasse 2	5	9	1	15
		Klasse 3	1	3	2	6
		Gesamt	45	16	6	67
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	<b>Vortest</b>	Klasse 1	11	2	3	16
		Klasse 2	1	3	4	8
		Klasse 3	0	1	10	11
		Gesamt	12	6	17	35

**Tab. A - 10:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachttest (Lernzuwachs/Lernerfolg (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad.

Zunächst werden die Versuchspersonen mit geringem Vorwissen betrachtet. Bei den Schülerinnen und Schülern, die sowohl im Vortest als auch im Nachtest der *Klasse 1* zugewiesen werden, beträgt die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit im Vortest 93,75 %, im Nachtest sinkt sie auf 90,89 %. Dementsprechend steigt die Summe der mittleren Wahrscheinlichkeiten der *Klasse 2* bzw. der *Klasse 3* anzugehören. Für die Versuchspersonen, die sowohl im Vor- als auch im Nachtest der *Klasse 3* angehören, erhöht sich der Wert von 87,29 % im Vortest auf 89,83 % im Nachtest. Die Summe der mittleren Wahrscheinlichkeiten, einer niedrigeren Klasse zugeordnet zu werden, sinkt somit.

Im Folgenden werden die Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen betrachtet. Bei den Versuchspersonen, die sowohl im Vor- als auch im Nachtest der *Klasse 3* angehören, erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der dritten Klasse zugeordnet zu werden, von 87,51 % im Vortest auf 93,97 % im Nachtest. Dementsprechend verringert sich die Summe der mittleren Wahrscheinlichkeiten, einer niedrigeren Klasse zugeordnet zu werden. Für Schülerinnen und Schüler, die in der *Klasse 1* verbleiben, erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der ersten Klasse zugewiesen zu werden, ebenfalls. Der Aufstieg von *Klasse 1* in eine höhere Klasse bedeutet für Lernende mit hohem Vorwissen demnach eine größere Hürde, als zum Beispiel das Verbleiben innerhalb der dritten Klasse. Bei den Versuchspersonen, die innerhalb der *Klasse 2* verbleiben, erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der *Klasse 2* zugeordnet zu werden, von 86,80 % im Vortest auf 93,99 % im Nachtest.

			Vortest		
Klassenwechsel VT/NT		N	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	Klasse 1/Klasse 1	39	93,75 %	4,66 %	1,59 %
	Klasse 2/Klasse 2	9	0,83 %	92,38 %	6,79 %
	Klasse 3/Klasse 3	2	9,38 %	3,33 %	87,29 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	Klasse 1/Klasse 1	11	89,78 %	10,16 %	0,06 %
	Klasse 2/Klasse 2	3	0,78 %	86,80 %	12,42 %
	Klasse 3/Klasse 3	10	6,25 %	6,24 %	87,51 %

**Tab. A - 11:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad.

			Nachttest		
Klassenwechsel VT/NT		N	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	Klasse 1/Klasse 1	39	90,89 %	7,08 %	2,03 %
	Klasse 2/Klasse 2	9	0,90 %	89,17 %	9,93 %
	Klasse 3/Klasse 3	2	6,87 %	3,30 %	89,83 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	Klasse 1/Klasse 1	11	93,16 %	6,19 %	0,80 %
	Klasse 2/Klasse 2	3	4,49 %	93,99 %	1,52 %
	Klasse 3/Klasse 3	10	4,07 %	1,96 %	93,97 %

**Tab. A - 12:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachttest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad.

#### D.1.1.2. Einfluss des Vorwissens und systemischer Darstellungsformen

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) die Änderung der Klassenzugehörigkeit positiv beeinflusst. Dabei wird der Grad des Vorwissens berücksichtigt. Bei den Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen verbessern sich in der Lerngruppe *A ges* (ohne Diagramme) etwa 3 %, es verschlechtern sich etwa 4,5 %. Innerhalb der Gruppe *B ges* (mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption) verbessern sich ebenfalls etwa 3 %, etwa 4,5 % verschlechtern sich. Innerhalb der Lerngruppe *C ges* (mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion) steigen etwa 6 % nach dem Treatment in eine höhere Klasse auf, etwa 4,5 % steigen in eine niedrigere ab. Demnach scheint bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen, die unterschiedliche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen kein Unterschied bei der Änderung der Klassenzugehörigkeit zu bedeuten. Die Arbeit mit den Fluss- und Wirkungsdiagrammen hat somit den Lernzuwachs bezüglich chemisch-physikalischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte nicht genügend unterstützt.

Bei den Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen zeigt sich ein anderes Bild. Innerhalb der Lerngruppe, die ohne Systemdiagramme gelernt hat (*A ges*), verbessern sich etwa 8,6 %. In eine niedrigere Klasse wechselt keine Versuchsperson. Innerhalb der Gruppe *B ges*, die fertige Fluss- und Wirkungsdiagramme genutzt hat, verbessern sich etwa 5,7 %, ebenfalls etwa 5,7 % verschlechtern sich. Bei den Schülerinnen und Schülern der Lerngruppe *C ges*, die eigenständig Fluss- und Wirkungsdiagramme konstruiert haben, steigen etwa 11,4 % nach dem Treatment in eine höhere Klasse auf. Keine der Versuchspersonen wird nach den Lernsitzen einer niedrigeren Klasse zugeordnet.

				Nachttest			
				Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Gesamt
Geringes Vorwissen (N = 67)	A ges	Vortest	Klasse 1	12	0	1	13
			Klasse 2	2	1	1	4
			Klasse 3	1	0	0	1
			Gesamt	15	1	2	18
	B ges	Vortest	Klasse 1	20	2	0	22
			Klasse 2	2	4	0	6
			Klasse 3	0	1	1	2
			Gesamt	22	7	1	30
	C ges	Vortest	Klasse 1	7	2	2	11
			Klasse 2	1	4	0	5
			Klasse 3	0	2	1	3
			Gesamt	8	8	3	19
Hohes Vorwissen (N = 35)	A ges	Vortest	Klasse 1	3	1	2	6
			Klasse 2	0	0	0	0
			Klasse 3	0	0	5	5
			Gesamt	3	1	7	11
	B ges	Vortest	Klasse 1	2	0	1	3
			Klasse 2	1	1	1	3
			Klasse 3	0	1	2	3
			Gesamt	3	2	4	9
	C ges	Vortest	Klasse 1	6	1	0	7
			Klasse 2	0	2	3	5
			Klasse 3	0	0	3	3
			Gesamt	6	3	6	15

**Tab. A - 13:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachttest (*Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

Bei den 21 Versuchspersonen der Gruppe *A ges*, den 30 Personen der Gruppe *B ges* und den 23 Personen der Gruppe *C ges*, die nach dem Treatment die Klasse nicht wechseln, kann „Lernen“ anhand der Änderung der mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeit näher bestimmt werden (siehe Tab. A - 14 auf Seite 366 und Tab. A - 15 auf Seite 367).

Zunächst werden die Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen betrachtet, die sowohl vor als auch nach den Lernsitzungen der gleichen Klasse angehören. Bei den Versuchspersonen, die innerhalb der *Klasse 1* verbleiben, verringert sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der ersten Klasse zugeordnet zu werden, für die Gruppe *A ges* von 96,83 % im Vortest auf 89,53 % im Nachtest und für die Gruppe *B ges* von 95,08 % auf 92,45 %. Für die Lerngruppe *C ges* steigt sie jedoch von 84,67 % im Vortest auf 88,78 % im Nachtest. Somit zeigt sich bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen zunächst ein tendenzieller Lernzuwachs bezüglich chemisch-physikalischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte für die Gruppen *A ges* und *B ges*, nicht jedoch für die Gruppe, die aktiv Diagramme konstruiert hat. Betrachtet man jedoch die Versuchspersonen, die innerhalb der *Klasse 3* verbleiben, erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der *Klasse 3* zugeordnet zu werden, für die Gruppe *B ges* von 76,64 % im Vortest auf 80,67 % im Nachtest und für die Gruppe *C ges* von 97,94 % auf 98,98 %. Schülerinnen und Schüler, die zwar geringes Vorwissen besitzen, bezüglich chemisch-physikalischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte jedoch über relativ viel Wissen verfügen, verbessern sich im Anschluss an das Treatment.

Nunmehr werden die Versuchspersonen mit hohem Vorwissen betrachtet, die die Klasse nach dem Treatment nicht wechseln. Für die Schülerinnen und Schüler, die über relativ viel chemisch-physikalisches und allgemeines systemtheoretisches Wissen verfügen (*Klasse 3/Klasse 3*) erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der dritten Klasse zugeordnet zu werden, innerhalb der Gruppe *A ges* von 83,35 % im Vortest auf 91,39 % im Nachtest, innerhalb der Gruppe *B ges* von 84,16 % auf 92,73 % und innerhalb der Gruppe *C ges* von 96,68 % auf 99,11 %. Demgegenüber zeigt sich bei Versuchspersonen, die zwar über hohes biologisches Vorwissen verfügen, aber relativ geringes chemisch-physikalisches und allgemeines systemtheoretisches Wissen besitzen (*Klasse 1/Klasse 1*), dass die mittlere Wahrscheinlichkeit, der *Klasse 1* zugewiesen zu werden, in allen drei Lerngruppen steigt. Innerhalb der Gruppe *A ges* erhöht sich die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit von 91,33 % im Vortest auf 98,46 % im Nachtest, innerhalb der Gruppe *B ges* von 88,46 % auf 92,85 % und innerhalb der Gruppe *C ges* von 89,45 % auf 90,33 %.

				<b>Vortest</b>		
		<b>Klassenwechsel VT/NT</b>	<b>N</b>	<b>Klasse 1</b>	<b>Klasse 2</b>	<b>Klasse 3</b>
<b>Geringes Vorwissen (N = 67)</b>	<b>A ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	12	96,83 %	0,33 %	2,84 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	1,88 %	96,60 %	1,52 %
		Klasse 3/Klasse 3	0	-	-	-
	<b>B ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	20	95,08 %	4,89 %	0,03 %
		Klasse 2/Klasse 2	4	0,72 %	94,14 %	5,14 %
		Klasse 3/Klasse 3	1	18,75 %	4,61 %	76,64 %
	<b>C ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	7	84,67 %	11,42 %	3,91 %
		Klasse 2/Klasse 2	4	0,66 %	89,57 %	9,77 %
		Klasse 3/Klasse 3	1	0,01 %	2,05 %	97,94 %
<b>Hohes Vorwissen (N = 35)</b>	<b>A ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	3	91,33 %	8,65 %	0,02 %
		Klasse 2/Klasse 2	0	-	-	-
		Klasse 3/Klasse 3	5	8,10 %	8,55 %	83,35 %
	<b>B ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	2	88,46 %	11,45 %	0,09 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	1,58 %	98,20 %	0,22 %
		Klasse 3/Klasse 3	2	11,00 %	4,84 %	84,16 %
	<b>C ges</b>	Klasse 1/Klasse 1	6	89,45 %	10,49 %	0,06 %
		Klasse 2/Klasse 2	2	0,38 %	81,10 %	18,52 %
		Klasse 3/Klasse 3	3	0,01 %	3,31 %	96,68 %

**Tab. A - 14:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

		Nachttest				
		Klassenwechsel VT/NT	N	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Geringes Vorwissen (N = 67)	A ges	Klasse 1/Klasse 1	12	89,53 %	7,31 %	3,16 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	0,76 %	99,17 %	0,07 %
		Klasse 3/Klasse 3	0	-	-	-
	B ges	Klasse 1/Klasse 1	20	92,45 %	5,50 %	2,05 %
		Klasse 2/Klasse 2	4	1,11 %	90,07 %	8,82 %
		Klasse 3/Klasse 3	1	13,73 %	5,60 %	80,67 %
	C ges	Klasse 1/Klasse 1	7	88,78 %	11,17 %	0,05 %
		Klasse 2/Klasse 2	4	0,74 %	85,76 %	13,50 %
		Klasse 3/Klasse 3	1	0,01 %	1,01 %	98,98 %
Hohes Vorwissen (N = 35)	A ges	Klasse 1/Klasse 1	3	98,46 %	0,54 %	1,00 %
		Klasse 2/Klasse 2	0	-	-	-
		Klasse 3/Klasse 3	5	8,11 %	0,50 %	91,39 %
	B ges	Klasse 1/Klasse 1	2	92,85 %	7,10 %	0,05 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	2,10 %	97,57 %	0,33 %
		Klasse 3/Klasse 3	2	0,04 %	7,23 %	92,73 %
	C ges	Klasse 1/Klasse 1	6	90,33 %	8,72 %	0,95 %
		Klasse 2/Klasse 2	2	5,68 %	92,20 %	2,12 %
		Klasse 3/Klasse 3	3	0,01 %	0,88 %	99,11 %

**Tab. A - 15:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachttest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

### D.1.1.3. Zusammenfassung

Ein Wechsel von *Klasse 1* in die *Klasse 2* bzw. *Klasse 3* oder von der *Klasse 2* in die *Klasse 3* bedeutet einen Lernzuwachs bezüglich physikalisch-chemischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte. In den Lernsituationen haben diese fachlichen Inhalte keine zentrale Rolle eingenommen. Sie sind nur von sehr wenigen Schülerinnen und Schülern verinnerlicht worden. Die LCA für das 3-Klassen-Modell zeigt, dass ein Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* weniger vom biologischen Vorwissen als vielmehr von chemisch-physikalischem und allgemeinem systemtheoretischem Vorwissen abhängt. Dabei

ist zu berücksichtigen, dass die Items der Kategorie *Lernerfolg* physikalische Chemie und allgemeine Systemtheorie zum Inhalt haben. Schülerinnen und Schüler, die hohes Vorwissen in diesen Bereichen mitbringen, profitieren unabhängig von ihrem biologischen Vorwissen vom Einsatz systemsicher Darstellungsformen. Diejenigen, die jedoch über hohes biologisches Vorwissen verfügen, profitieren stärker von dem Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen.

## D.1.2 2-Klassen-LCA-Modell

### D.1.2.1. Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 2-Klassen-LCA-Modells

Die geringste Wahrscheinlichkeit, einer der beiden Klassen zugeordnet zu werden, beträgt 50 %. In diesem Fall wäre das Antwortmuster der Versuchsperson weder der einen noch der anderen Klasse eindeutig zuzuweisen. Die geringste Wahrscheinlichkeit, mit der eine Versuchsperson dieser Studie einer Klasse zugeordnet wird, beträgt 55,02 %. 79,4 % werden einer der beiden Klassen mit einer Wahrscheinlichkeit von > 90 %, 51 % mit einer Wahrscheinlichkeit von > 99 % und 17,2 % mit einer Wahrscheinlichkeit von > 99,9 % zugewiesen. Die mittleren maximalen Zuordnungswahrscheinlichkeiten (siehe Tab. A - 16) liegen in stets über 90 %. Die alternativen Zuordnungswahrscheinlichkeiten liegen für beide Klassen unter 7 %. Demnach bildet das 2-Klassen-LCA-Modell die Daten zuverlässig ab.

Klasse	Erwartete Größe		Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 1	Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit Klasse 2
	N	N [%]		
1	118	57,6	93,2 %	6,8 %
2	86	42,4	4,8 %	95,2 %
Gesamt	204 <sub>52</sub>	100		

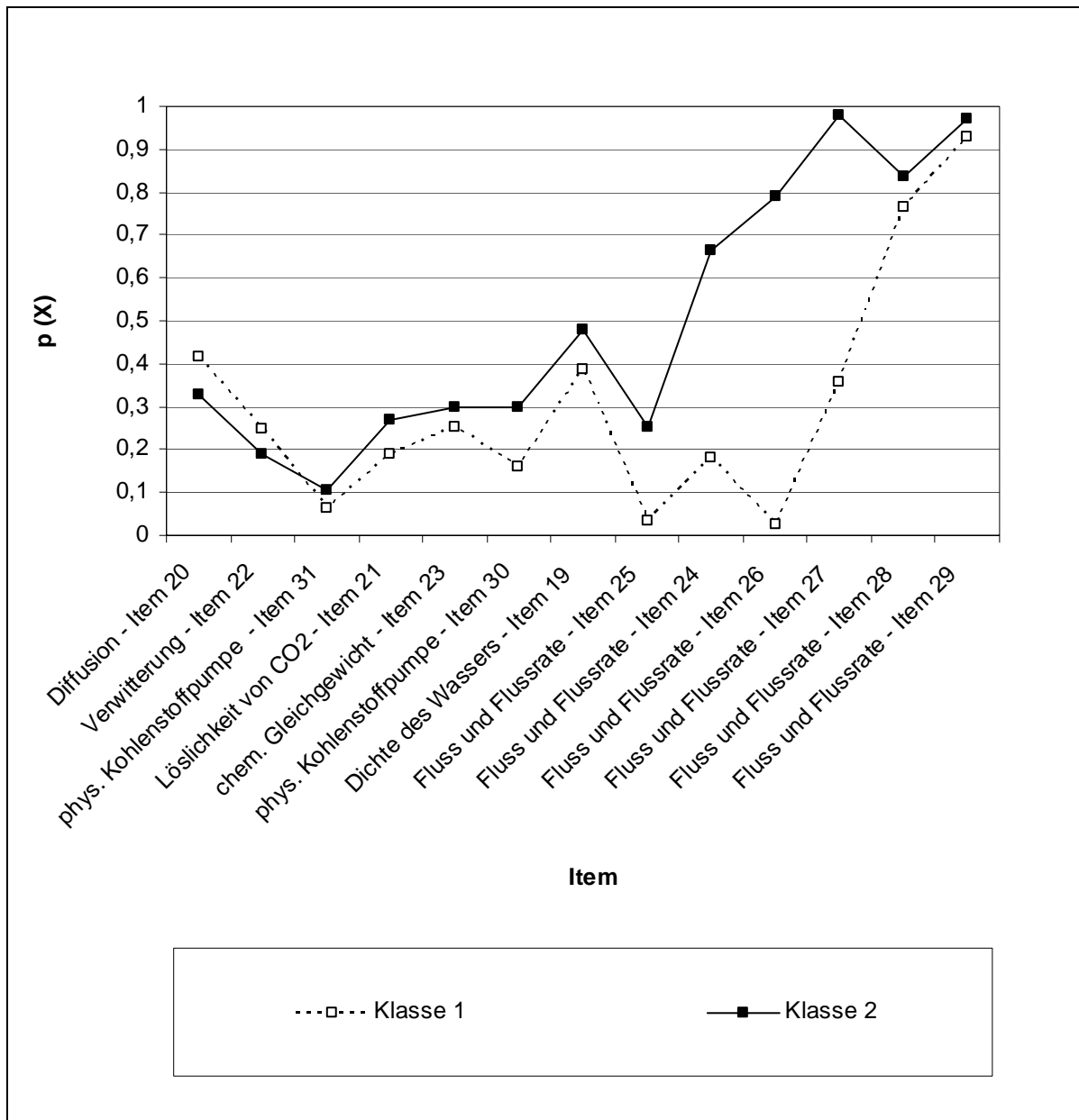
**Tab. A - 16:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 2-Klassen-LCA-Modells.

<sup>52</sup> Die Datensätze aus Vor- und Nachtest wurden vor der Modellierung zusammengefügt. Daher ergeben sich 204 Versuchspersonen ( $N = 102 \cdot 2 = 204$ ).



### D.1.2.2. Itemprofile des 2-Klassen-LCA-Modells

In Folgenden werden die Itemprofile der zwei latenten Klassen graphisch dargestellt (siehe Abb. A - 1 auf Seite 369) und erläutert. In der *Klasse 1* werden 59 % der Versuchspersonen zusammengefasst. *Klasse 1* enthält 122 Schülerinnen und Schüler. Sie ist die größte der beiden Klassen. In der *Klasse 2* werden 40,2 % der Versuchspersonen zusammengefasst. Die *Klasse 2* enthält 82 Schülerinnen und Schüler.



**Abb. A - 1:** Itemprofile der latenten Klassen eines 2-Klassen-LCA-Modells für die Datensätze *Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31) aus Vortest und Nachtest.

Innerhalb der *Klasse 1* liegt die Wahrscheinlichkeit ein Item richtig zu beantworten, für sieben der 13 Lernerfolgitems unter 25 %. Die Schülerinnen und Schüler verfügen demnach nur über sehr geringes Faktenwissen und Verständnis. Lediglich die Items 20 und 22 werden von Versuchspersonen der *Klasse 1* mit einer größeren Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet als von Personen der anderen Klasse. Es handelt sich hierbei um relativ einfache chemisch-physikalische bzw. geologische Konzepte (Diffusion und Verwitterung). Fragen zu ebenso einfachen systemtheoretischen Konzepten, wie sie in den Items 28 und 29 auftreten, beantworten die Schülerinnen und Schüler mit einer Wahrscheinlichkeit von über 75 % richtig. *Klasse 1* umfasst somit Versuchspersonen, die über relativ geringes themenspezifisches Wissen verfügen, einfache chemisch-physikalische, geologische und allgemeine systemtheoretische Konzepte jedoch kennen.

Innerhalb der *Klasse 2* werden lediglich zwei Items mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 25 % richtig beantwortet. Mit Ausnahme der Items 20 und 22 werden die Items von Schülerinnen und Schülern der *Klasse 2* mit einer größeren Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet als von Versuchspersonen der *Klasse 1*. Die *Klasse 2* umfasst somit Personen, die vor allem über relativ viel chemisch-physikalisches und allgemeines systemtheoretisches Faktenwissen und Verständnis verfügen.

#### D.1.2.3. Analyse des Lernzuwachses in der Kategorie Lernerfolg

Bei der LCA beschreibt ein Klassenwechsel vom Vor- zum Nachtest eine Änderung des Wissensstandes. „Lernen“ ist definiert als ein Wechsel von einer „niedrigeren“ Klasse in eine „höhere“ Klasse. Die Änderung der Klassenzugehörigkeit von Lernenden zwischen Vor- und Nachtest werden in einer Kreuztabelle dargestellt (siehe Tab. A - 17).

		Nachtest		
		Klasse 1	Klasse 2	Gesamt
Vortest	Klasse 1	52	10	62
	Klasse 2	8	32	40
	Gesamt	60	42	102

**Tab. A - 17:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest (*Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31)).

Von den 102 Versuchspersonen, die in dieser Studie berücksichtigt werden, verbleiben 52 nach den Lernsitzungen in der ersten Klasse und 32 in der zweiten Klasse. Zehn Schülerinnen und Schüler sind im Vortest am wahrscheinlichsten der *Klasse 1* und im Nachtest am wahrscheinlichsten der *Klasse 2* zugeordnet worden. Sie haben ihr Wissen über chemisch-physikalische und systemtheoretische Aspekte verbessert. Acht Versuchspersonen sind jedoch von der zweiten Klasse in die erste Klasse zurückgefallen. Somit haben sich nach dem Treatment zehn verbessert, acht jedoch verschlechtert. In den Zellen der Hauptdiagonalen sind die Versuchspersonen aufgeführt, die im Vortest und im Nachtest derselben Klasse am wahrscheinlichsten angehören. Im Sinne der obigen Definition von „Lernen“ ist bei diesen Schülerinnen und Schülern kein Lernzuwachs zu erkennen. „Lernen“ kann hier jedoch anhand der Änderung der mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeit ermittelt werden (siehe Tab. A - 18 und Tab. A - 19 auf Seite 371).

Zunächst werden die Versuchspersonen betrachtet, die sowohl im Vortest als auch im Nachtest der *Klasse 1* zugeordnet worden sind. Die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit beträgt beim Vortest 96,26 %, beim Nachtest sinkt sie auf 92,14 %. Dementsprechend steigt die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit für die *Klasse 2* von 3,74 % im Vortest auf 7,86 % im Nachtest.

Für die Versuchspersonen, die sowohl im Vor- als auch im Nachtest der *Klasse 2* angehört haben zeigt sich ein anderes Bild. Während die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit im Vortest noch bei 96,06 % liegt, sinkt sie im Nachtest auf 95,13 %. Dementsprechend steigt die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit, der *Klasse 1* anzugehören, von 3,94 % im Vortest auf 4,87 % im Nachtest. Die Unterschiede zwischen den Werten im Vortest und denen im Nachtest sind bei den Schülerinnen und Schülern, die in der *Klasse 2* verbleiben, geringer als bei den Versuchspersonen, die in der *Klasse 1* verbleiben. Somit kann ein tendenzieller Lernzuwachs im Anschluss an die Lernsitzungen angenommen werden.

		<b>Vortest</b>		
<b>Klassenwechsel VT/NT</b>	N	Klasse 1	Klasse 2	Gesamt
Klasse 1/Klasse 1	52	96,26 %	3,74 %	100 %
Klasse 2/Klasse 2	32	3,94 %	96,06 %	100 %

**Tab. A - 18:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.

		Nachttest		
Klassenwechsel VT/NT	N	Klasse 1	Klasse 2	Gesamt
Klasse 1/Klasse 1	52	92,14 %	7,86 %	100 %
Klasse 2/Klasse 2	32	4,87 %	95,13 %	100 %

**Tab. A - 19:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachttest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.

### Einfluss des Vorwissens

Im Folgenden wird der Einfluss des Vorwissens untersucht. Welchen Vorwissensgrad haben die zehn Versuchspersonen, die in die höhere Klasse wechseln, und welchen die acht Personen, die in die niedrigere Klasse zurückfallen? Von den Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen sind sechs von der ersten Klasse in die zweite Klasse aufgestiegen (siehe Tab. A - 20 auf Seite 372). Vier Versuchspersonen sind jedoch von der *Klasse 2* in die *Klasse 1* gewechselt. Von den Personen mit hohem Vorwissen sind vier in die höhere Klasse aufgestiegen und vier in die niedrigere zurückgefallen. Somit haben sich im Sinne der obigen Definition von „Lernen“ etwa 11,4 % der Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen und etwa 8,9 % der Personen mit geringem Vorwissen verbessert. Etwa 11,4 % der Lernenden mit hohem Vorwissen und etwa 5,9 % der Lernenden mit geringem Vorwissen haben sich verschlechtert. Das Vorwissen hat nach alledem anscheinend keinen nennenswerten Einfluss auf die Änderung der Klassenzugehörigkeit zwischen Vor- und Nachttest.

			Nachttest		
			Klasse 1	Klasse 2	Gesamt
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	<b>Vortest</b>	Klasse 1	33	6	39
		Klasse 2	4	24	28
		Gesamt	37	30	67
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	<b>Vortest</b>	Klasse 1	19	4	23
		Klasse 2	4	8	12
		Gesamt	23	12	35

**Tab. A - 20:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachttest (*Lernzuwachs/Lernerfolg* (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad.

In Tab. A - 21 und in Tab. A - 22 auf Seite 373 sind die mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die Schülerinnen und Schüler, die die Klasse nicht im Anschluss an die Lernsituationen wechseln, dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Versuchspersonen mit hohem Vorwissen, die mittlere Wahrscheinlichkeit der *Klasse 2* anzugehören, zwischen Vor- und Nachtest von 2,89 % auf 6,81 % bzw. von 96,06 % auf 98,46 % steigt. Bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit der *Klasse 2* anzugehören für in der *Klasse 1* verbleibende Personen von 4,23 % auf 8,46 %. Für Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen, die die *Klasse 2* nicht wechseln, verringert sich die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit, der *Klasse 2* anzugehören, von 95,99 % auf 94,02 %. Somit kann von einem relativ geringen positiven Einfluss des Vorwissens auf den Lernzuwachs in der Kategorie *Lernerfolg* gesprochen werden.

			<b>Vortest</b>		
		<b>Klassenwechsel VT/NT</b>	N	Klasse 1	Klasse 2
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	Klasse 1/Klasse 1		33	95,77 %	4,23 %
	Klasse 2/Klasse 2		24	4,01 %	95,99 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	Klasse 1/Klasse 1		19	97,11 %	2,89 %
	Klasse 2/Klasse 2		8	3,94 %	96,06 %

**Tab. A - 21:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad.

			<b>Nachtest</b>		
		<b>Klassenwechsel VT/NT</b>	N	Klasse 1	Klasse 2
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	Klasse 1/Klasse 1		33	91,54 %	8,46 %
	Klasse 2/Klasse 2		24	5,98 %	94,02 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	Klasse 1/Klasse 1		19	93,19 %	6,81 %
	Klasse 2/Klasse 2		8	1,54 %	98,46 %

**Tab. A - 22:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachtest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad.

## Einfluss des Vorwissens und systemischer Darstellungsformen

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen (*ohne Diagramme vs. mit Diagrammen – keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption vs. mit Diagrammen – Anleitung zur aktiven Konstruktion*) die Änderung der Klassenzugehörigkeit positiv beeinflusst.

				Nachttest		
				Klasse 1	Klasse 2	Gesamt
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	<i>A ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	10	2	12
			Klasse 2	0	6	6
			Gesamt	10	8	18
	<i>B ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	15	3	18
			Klasse 2	2	10	12
			Gesamt	17	13	30
	<i>C ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	8	1	9
			Klasse 2	2	8	10
			Gesamt	10	9	19
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	<i>A ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	7	3	10
			Klasse 2	0	1	1
			Gesamt	7	4	11
	<i>B ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	5	0	5
			Klasse 2	3	1	4
			Gesamt	8	1	9
	<i>C ges</i>	<b>Vortest</b>	Klasse 1	7	1	8
			Klasse 2	1	6	7
			Gesamt	8	7	15

**Tab. A - 23:** Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachttest (Lernzuwachs/Lernerfolg (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

Sowohl das Arbeiten mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen (*B ges*) als auch das eigenständige Konstruieren dieser Systemdiagramme verbessert das Wissen über chemisch-physikalische und allgemeine systemtheoretische Konzepte nicht nennenswert (siehe Tab. A - 23 auf Seite 374). Den Wechsel in die höhere Klasse vollziehen fünf Versuchspersonen, die ohne Diagramme gelernt haben (*A ges*), drei Personen, die mit fertigen Diagrammen gearbeitet haben (*B ges*) und zwei Personen, die aktiv Diagramme konstruiert haben (*C ges*). Der Wechsel in die niedrigere Klasse tritt nur bei den Lerngruppen auf, bei denen Systemdiagramme zum Einsatz gekommen sind (*B ges* und *C ges*). Fünf Personen, die mit fertigen Fluss- und Wirkungsdiagrammen in den Lernsitzen gearbeitet haben (*B ges*), wechseln von der *Klasse 2* in die *Klasse 1* zurück. Drei Versuchspersonen, die eigenständig innerhalb der Lernsitzen Systemdiagramme konstruiert haben (*C ges*), sind im Vortest der zweiten Klasse, im Nachtest hingegen der ersten Klasse zugeordnet worden.

Betrachtet man bei den Personen, die die Klasse im Anschluss an das Treatment nicht wechseln, die mittleren Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu *Klasse 1* und *Klasse 2*, zeigt sich hingegen, insbesondere bei Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen, ein tendenziell positiver Effekt des Einsatzes von Systemdiagrammen auf das Lernen.

			Vortest		
		Klassenwechsel VT/NT	N	Klasse 1	Klasse 2
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	<i>A ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	10	94,76 %	5,24 %
		Klasse 2/Klasse 2	6	5,66 %	94,34 %
	<i>B ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	15	96,32 %	3,68 %
		Klasse 2/Klasse 2	10	3,76 %	96,24 %
	<i>C ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	8	95,99 %	4,11 %
		Klasse 2/Klasse 2	8	3,09 %	96,91 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	<i>A ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	7	94,32 %	5,68 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	0,25 %	99,75 %
	<i>B ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	5	97,37 %	2,63 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	8,77 %	91,23 %
	<i>C ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	7	99,70 %	0,30 %
		Klasse 2/Klasse 2	6	3,46 %	96,54 %

**Tab. A - 24:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

			Nachttest		
		Klassenwechsel VT/NT	N	Klasse 1	Klasse 2
<b>Geringes Vorwissen</b> (N = 67)	<i>A ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	10	89,86 %	10,14 %
		Klasse 2/Klasse 2	6	3,23 %	96,77 %
	<i>B ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	15	93,69 %	6,31 %
		Klasse 2/Klasse 2	10	5,87 %	94,13 %
	<i>C ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	8	89,62 %	10,38 %
		Klasse 2/Klasse 2	8	8,18 %	91,82 %
<b>Hohes Vorwissen</b> (N = 35)	<i>A ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	7	92,76 %	7,24 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	2,84 %	97,16 %
	<i>B ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	5	92,74 %	7,26 %
		Klasse 2/Klasse 2	1	5,99 %	94,11 %
	<i>C ges</i>	Klasse 1/Klasse 1	7	90,65 %	9,35 %
		Klasse 2/Klasse 2	6	5,08 %	94,92 %

**Tab. A - 25:** Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachttest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen.

Für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen, die mit fertigen Diagrammen gelernt haben (*B ges*) und in der *Klasse 1* verblieben sind, erhöht sich die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit für die *Klasse 2* von 2,63 % im Vortest auf 7,26 % im Nachttest (siehe Tab. A - 24 auf Seite und Tab. A - 25 auf Seite 376). Für Personen mit hohem Vorwissen, die aktiv Systemdiagramme konstruiert haben (*C ges*) und in der *Klasse 1* verblieben sind, erhöht sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, der *Klasse 2* zugeordnet zu werden, sogar von 0,30 % im Vortest auf 9,35 % im Nachttest. Bei den Schülerinnen und Schülern mit hohem Vorwissen, die ohne Diagramme gelernt haben (*A ges*) und in der *Klasse 1* verblieben sind, steigt die mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeit für die *Klasse 2* von 5,68 % im Vortest lediglich auf 7,24 % im Nachttest. Demnach profitieren Versuchspersonen mit hohem Vorwissen stärker vom Lernen mit Systemdiagrammen als vom Lernen ohne Diagramme.



Bei Schülerinnen und Schülern mit geringen Vorwissen, die in der *Klasse 1* verblieben sind, zeigt sich für alle drei Lerngruppen (*A ges*, *B ges* und *C ges*) ein vergleichbarer Anstieg der mittleren Wahrscheinlichkeit, der *Klasse 2* zugeordnet zu werden. Für die Gruppe *A ges* erhöht sich die Zuordnungswahrscheinlichkeit von 5,24 % im Vortest auf 10,14 % im Nachtest, für die Gruppe *B ges* von 3,68 % auf 6,31 % und für die Gruppe *C ges* von 4,11 % auf 10,38 %.

#### **D.1.2.4. Zusammenfassung**

Ein Wechsel von *Klasse 1* im Vortest in die *Klasse 2* im Nachtest bedeutet einen Lernzuwachs bezüglich physikalisch-chemischer und allgemeiner systemtheoretischer Konzepte. In den Lernsituationen haben diese fachlichen Inhalte keine zentrale Rolle eingenommen. Sie sind nur von sehr wenigen Schülerinnen und Schülern verinnerlicht worden. Die LCA für das 2-Klassen-Modell zeigt jedoch, dass ein Lernzuwachs in der Kategorie Lernerfolg tendenziell vom Vorwissen und von der Form des Einsatzes systemischer Darstellungsformen abhängig ist. Sowohl Lernende mit geringem als auch Lernende mit hohem Vorwissen reagieren positiv auf den Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen. Versuchspersonen mit hohem Vorwissen reagieren jedoch stärker als diejenigen mit geringem Vorwissen.

## Literaturverzeichnis

- AG Rahmenplan des BLK-Programms „21“ – Bildung für eine nachhaltige Entwicklung, Orientierungshilfen für die Erstellung einer Präambel und Empfehlung/Richtlinien zur „Bildung für eine nachhaltige Entwicklung“ in Allgemeinbildenden Schulen. Berlin.
- APO-AH (2003): Ausbildungs- und Prüfungsordnung zum Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Gesetze und Verordnungen im Hamburger Bildungswesen (HmbGVBl). Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Bildung und Sport, Hamburg.
- Ausubel, D. P. (1968): Educational psychology: A cognitive view. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- Baumert, J., Artelt, C., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Schümer, G., Stanat, P., Tillmann, K.-J. & Weiß, M. (Hrsg.) (2002): PISA 2000 – Die Länder der Bundesrepublik Deutschland im Vergleich: Zusammenfassung zentraler Befunde. Leske + Budrich, Opladen.
- Baumert, J., Bos, W. & Lehmann, R. (Hrsg.) (2000a): TIMSS/III. Dritte Internationale Mathematik und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn. Band 1: Mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung am Ende der Pflichtschulzeit. Leske + Budrich, Opladen.
- Baumert, J., Bos, W. & Lehmann, R. (Hrsg.) (2000b): TIMSS/III. Dritte Internationale Mathematik und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn. Band 2: Mathematische und physikalische Kompetenzen am Ende der gymnasialen Oberstufe. Leske + Budrich, Opladen.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.-J. & Weiß, M. (2001): PISA 2000 – Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich. Leske + Budrich, Opladen.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M. et al. (1997): TIMMS – Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: deskriptive Befunde. Leske + Budrich, Opladen.
- Bayrhuber, H. & Schaefer, G. (1980): Kybernetische Biologie. Aulis Verlag Deubner, Köln.
- Bell, T. (2002): Strukturprinzipien der Selbstregulation - Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II. Dissertation. IPN, Christian-Albrechts-Universität Kiel.

- Ben-Zvi – Assaraf, O. & Orion, N. (2001): Studying the Water Cycle in an Environmental Context. The „Blue Planet“-Program (paper presented at the NARST).
- Berner, R. A. (1999): A new look at the long-term carbon cycle. *GSA Today* 9 (11): 1 – 6.
- Blokland, P. van & Kok, D. (1989): Dynamische Simulatie. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Blumenstein, O., Schachtzabel, H., Barsch, H. et al. (2000): Grundlagen der Geoökologie. Springer, Berlin.
- Bolin, B., Sukumar, R., Ciaia, P. et al. (2000): Global Perspective. In: IPCC – Land-use, Land-use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC. Cambridge University Press.
- Bortz, J. (1999): Statistik für Sozialwissenschaftler (5. Aufl.). Springer, Berlin.
- Bortz, J. & Döring, N. (2002): Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler (3. Aufl.). Springer, Berlin.
- Bossel, H. (1999): Allgemeine Systemtheorie und Kybernetik. In: Fränzle, Müller & Schröder: Handbuch der Umweltwissenschaften. ecomed, München.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991): Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction* 8 (4): 293 – 332.
- Der Große Brockhaus (1980): Der Große Brockhaus in zwölf Bänden (18. Aufl.). F. A. Brockhaus, Wiesbaden.
- Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) (1999). Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. Heft 72. Bonn.
- Butcher, S. S., Charlson, R. J., Orians, G. H. & Wolfe, G. V. (1992): Global Biogeochemical Cycles. International Geophysics Series, Vol. 50. Academic Press, London.
- Davier, M. v. (2001): Winmira 2001. Kiel.
- Dörner, D. (2000): Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen (13. Aufl.). Rowohlt Verlag GmbH, Reinbek.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E. et al. (2000): The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290: 291 – 296.
- Faul, F. & Erdfelder, E. (1992): G\*POWER: A priori, post-hoc, and compromise power analyses for MS-DOS [Computersoftware]. Bonn University, Dep. of Psychology, Bonn.
- Forrester, J. W. (1969): Urban Dynamics. The MIT Press, Cambridge.
- Forrester, J. W. (1971): World Dynamics. Pegasus Communications, Waltham.
- Forrester, J. W. (1991): System Dynamics and the Lessons of 35 Years. MIT, Cambridge.

- Forrester, J. W. (1992): System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12<sup>th</sup>-Grade Education. MIT, Cambridge.
- Forrester, J. W. (1994): System Dynamics, System Thinking and Soft OR. *System Dynamics Review* 10 (2).
- Funke, J. (1984): Diagnose der westdeutschen Problemlöseforschung in Form einiger Thesen. *Sprache und Kognition* 3 (3): 159 – 172.
- Funke, J. (1985): Problemlösen in komplexen computersimulierten Realitätsbereichen. *Sprache und Kognition* 4 (3): 113 – 129.
- Funke, J. (1995): Experimental Research on Complex Problem Solving. In: P. A. Frensch et al. (Hrsg.): Complex Problem Solving: The European Perspective. Erlbaum, New Jersey.
- Funke, J. & Müller, H. (1988): Eingreifen und Prognostizieren als Determinanten von Systemidentifikation und Systemsteuerung. *Sprache und Kognition* 7 (3): 176 – 186.
- Gerstenmaier, J. & Mandl, H. (1995): Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik* 41 (6): 867 – 888.
- Gomez, P. & Probst, G. J. (1987): Vernetztes Denken im Management: Eine Methodik des ganzheitlichen Problemlösens. *Die Orientierung* 89. Schweizerische Volksbank, Bern.
- Gomez, P. & Probst, G. J. (1997): Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens: Vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen (2. Aufl.). Paul Haupt, Bern.
- Gudovitch, Y. & Orion, N. (2001): The carbon cycle and the earth systems – studying the carbon cycle in multidisciplinary environmental context. Department of Science Teaching, Weizmann Institute of Science Rehovot, Israel.
- Hagel, J. (1985). Möglichkeiten der Darstellung von Systemen im Geographieunterricht. *Geographie und Schule* 33: 19 – 28.
- Harvey, L. D. D., Gregory, J., Hoffert, M. et al. (1997): An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper II. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Houghton, R. A. (1999): The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850 – 1990. *Tellus* 51 B: 298 – 313.
- Houghton, R. A. (2000): A new estimate of global sources and sinks of carbon from land-use change. *EOS* 81.

- Houghton, R. A. & Hackler, J. L. (1999): Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology* 5: 481 – 492.
- Hübner, R. (1988): Die kognitive Regelung dynamischer Systeme und der Einfluss analoger versus digitale Informationsverarbeitung. *Zeitschrift für Psychologie* 196 (2): 161 – 170.
- Hussy, W. (1991): Komplexes Problemlösen und Verarbeitungskapazität. *Sprache und Kognition* 10 (4): 208 – 220.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Ittekkot, V., Rixen, T., Suthhof, A. et al. (2002): Der globale Kohlenstoffkreislauf. In: Wefer, G. (Hrsg.): Expedition Erde – Beiträge zum Jahr der Geowissenschaften 2002. Universität Bremen.
- Jain, A. K., Kheshgi, H. S., Hoffert, M. I. et al. (1995): Distribution of radiocarbon as a test of global carbon-cycle models. *Global Biogeochemical Cycles* 9: 153 – 166.
- Kali, Y., Orion, N. & Eylon, B.-S. (2001): The Effect of Knowledge Integration Activities on Students' Perception of the Earth's Crust as a Cyclic System, Department of Science Teaching, Weizmann Institute of Science Rehovot, Israel (submitted to the Journal of Research in Science Teaching).
- Klieme, E. (2004): Was sind Kompetenzen und wie lassen sie sich messen? *Pädagogik* 6: 10 – 13.
- Klieme, E., Bulmahn, E., Wolff, K. et al. (2003): Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards – Eine Expertise. Deutsches Institut für Internationale Pädagogische Forschung, Frankfurt a. M.
- Klieme, E. & Maichle, U. (1991). Erprobung eines Modellbildungssystems im Unterricht. Bericht über eine Pilotstudie zur Unterrichtsevaluation. Institut für Test- und Begabungsforschung, Bonn.
- Klieme, E. & Maichle, U. (1994). Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I. Auswertung von Unterrichtsversuchen mit dem Modellbildungssystem MODUS. Institut für Bildungsforschung, Bonn.
- KMK (2004): Vereinbarung über Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10) in den Fächern Biologie, Chemie, Physik. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004.

- Koller, D. (1993): Vernetztes Denken – Denken in Wirkungsnetzen. Bericht über fächerverbindendes Thema in Gymnasien. *Schulintern – Informationen für Lehrer in Baden-Württemberg* 1993 (12): 1 – 4.
- Koller, D. (1995): Simulation Dynamischer Vorgänge. Klett, Stuttgart.
- Kramer, B. (2005): Mentale Integration von Text und Bild beim Lernen mit Multimedia am Beispiel der olfaktorischen Signaltransduktion. Elektronische Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, [http://e-diss.uni-kiel.de/diss\\_1546/](http://e-diss.uni-kiel.de/diss_1546/) (Stand: 15.07.2006).
- Kühle, H.-J. & Badke, P. (1986): Die Entwicklung von Lösungsvorstellungen in komplexen Problemsituationen und die Gedächtnisstruktur. *Sprache und Kognition* 5 (2): 95 – 105.
- Lehrplan Biologie für die Sekundarstufe I (1997): Lehrplan für die Sekundarstufe I der weiterführenden allgemeinbildenden Schulen – Hauptschule, Realschule, Gymnasium – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Biologie für die Sekundarstufe II (2002): Lehrplan für die Sekundarstufe II – Gymnasium, Gesamtschule – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Chemie für die Sekundarstufe I (1997): Lehrplan für die Sekundarstufe I der weiterführenden allgemeinbildenden Schulen – Hauptschule, Realschule, Gymnasium – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Chemie für die Sekundarstufe II (2002): Lehrplan für die Sekundarstufe II – Gymnasium, Gesamtschule – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Erdkunde für die Sekundarstufe I (1997): Lehrplan für die Sekundarstufe I der weiterführenden allgemeinbildenden Schulen – Hauptschule, Realschule, Gymnasium – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Erdkunde für die Sekundarstufe II (2002): Lehrplan für die Sekundarstufe II – Gymnasium, Gesamtschule – Biologie. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Lehrplan Methodik (2002): Lehrplan für die Sekundarstufe II – Gymnasium, Gesamtschule, Fachgymnasium – Methodik. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.

- Lewalter, D. (1997): Lernen mit Bildern und Animationen: Studie zum Einfluss von Lernmerkmalen auf die Effektivität von Illustrationen. Waxmann, Münster.
- Lexikon der Geowissenschaften (2002). LANDSCAPE Gesellschaft für Geokommunikation. Spektrum, Heidelberg.
- Lochte, K. (2004): Kohlenstoffflussdaten (Folie). Wissenschaftlicher Beirat des BMBF-Projektes „Forschungsdialog: System Erde“. Sitzung (08. November 2004).
- Lowe, R. K. (1999): Extracting information from an animation during complex visual learning. *European Journal of Psychology of Education* 14 (2): 225 – 244.
- Maierhofer, M. (2001): Förderung des systemischen Denkens durch computerunterstützten Biologieunterricht. GCA-Verlag, Herdecke.
- Mandl, H., Gruber, H. & Renkl, A. (1993): Lernen im Physikunterricht – Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen. Forschungsbericht Nr. 19, Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Empirische Pädagogik und Pädagogische Psychologie.
- Mandinach, E. (1989): Model-Building and the Use of Computer Simulation of Dynamic Systems. *Journal of Education Computing Research* 5 (2): 221 – 243.
- Mayer, J., Harms, U., Hammann, M., Bayrhuber, H. & Kattmann, U. (2004): Kerncurriculum Biologie der gymnasialen Oberstufe. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht* 57 (3): 166 – 173.
- Mayer, R. E. (1997): Multimedia learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist* 32 (1): 1 – 19.
- Mayer, R. E. & Gallini, J. K. (1990): When is an illustration worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology* 84 (4): 444 – 452.
- McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S. et al. (2001): Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO<sub>2</sub>, climate and land-use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles* 15 (1): 183 – 206.
- Moreno, R. & Mayer, R. E. (1999): Cognitive principles of multimedia learning: The role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology* 91 (2): 358 – 368.
- Nerdel, C. (2003): Die Wirkung von Animation und Simulation auf das Verständnis von stoffwechselphysiologischen Prozessen. Elektronische Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, [http://e-diss.uni-kiel.de/diss\\_727/](http://e-diss.uni-kiel.de/diss_727/) (Stand: 15.07.2006).
- OECD (2003): The PISA 2003 Assessment Framework, Mathematics, Reading, Science and Problem Solving Knowledge and Skills. Paris, France.

- Ossimitz, G. (1990): Materialien zur Systemdynamik. Schriftenreihe Didaktik der Mathematik (Band 19). Teubner, Stuttgart – Wien.
- Ossimitz, G. (1994): Endbericht zum Projekt „Systemdynamiksoftware im Unterricht“. Universität Klagenfurt, Klagenfurt.
- Ossimitz, G. (1996): Projekt „Entwicklung vernetzten Denkens“. Endbericht an die Forschungskommission. Universität Klagenfurt, Klagenfurt.
- Ossimitz, G. (2000a): Entwicklung systemischen Denkens. Klagenfurter Beiträge zur Didaktik der Mathematik, Bd. 1. Profil-Verlag, München-Wien.
- Ossimitz, G. (2000b): Einführung in die Systemwissenschaften. Skriptum zur Vorlesung SS 2000. <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/lv/usw00/skr/start.htm>
- Ossimitz, G. (2001): Unterscheidung von Bestands- und Bewegungsmassen: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. *Beiträge zum Mathematikunterricht 2001*: 468 – 471.
- Ossimitz, G. (2002): Systemisches Denken braucht systemische Darstellungsmittel. <http://www.uni-klu.ac.at/users/gossimit/pap/sysdd.pdf>
- Ossimitz, G., Galli, S., Gratzner, E. et al. (2000): Endbericht zum Projekt „Unterscheidung von Bestands- und Flussgrößen“. Universität Klagenfurt, Klagenfurt.
- OVO (1998): Landesverordnung über die Gestaltung der Oberstufe der Gymnasien und Gesamtschulen in Schleswig-Holstein (Oberstufenverordnung – OVO). Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Pahl-Wostl, C. (1999): Netzwerktheorie – Analyse von Stoff- und Energietransfer. In: Fränzle, Müller & Schröder: Handbuch der Umweltwissenschaften. ecomed, München.
- Paivio, A. & Harshman, R. (1983): Factor analysis of a questionnaire on imagery and verbal habits and skills. *Canadian Journal of Psychology* 37 (4): 461 – 483.
- 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.
- Prenzel, M., Rost, J., Senkbeil, M., Häußler, P. & Klopp, A. (2001): Naturwissenschaftliche Grundbildung: Testkonzeption und Ergebnisse, PISA 2000 – Basiskompeten-



- zen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich. Deutsches PISA-Konsortium, Leske + Budrich, Opladen.
- Putz-Osterloh, W. (1983): Über Determinanten komplexer Problemlösungen und Möglichkeiten zu ihrer Erfassung. *Sprache und Kognition* 1983 (2): 100 – 116.
- Putz-Osterloh, W. (1987): Gibt es Experten für komplexe Probleme. *Zeitschrift für Psychologie* 195: 63 – 84.
- Putz-Osterloh, W., Bott, B. & Houben, I. (1988): Beeinflusst Wissen über ein realitätsnahes System dessen Steuerung? *Sprache und Kognition* 7 (4): 240 – 251.
- Reither, F. (1985): Wertorientierung in komplexen Entscheidungssituationen. *Sprache und Kognition* 4 (1): 21 – 27.
- Richmond, B., Peterson, S. & Vescusco, P. (1987): An Academic User's Guide to STELLA. High Performance Systems, Lyme (NJ).
- Riding, R. J. & Watts, M. (1997): The effect of cognitive style on the preferred format of instructional material. *Educational Psychology* 17: 179 – 183.
- Rost, J. (1996): Lehrbuch Testtheorie – Testkonstruktion. Huber, Bern.
- Rost, J., Lauströer, A. & Raack, N. (2003): Kompetenzmodelle einer Bildung für Nachhaltigkeit. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie* 8 (52): 10 – 15.
- Salomon, G. (1979): Interaction of Media, Cognition and Learning: An Exploration of how Symbolic Forms Cultivate Mental Skills and Affect Knowledge Acquisition. Jossey-Bass, San Francisco.
- Schanze, S. (2001): Wissenserwerb mithilfe der internetbasierten Lernumgebung ChemNet – Eine empirische Untersuchung zum Lernen mit linearen und vernetzten Hypertexten. Elektronische Dissertation, Christian-Abrechts-Universität, Kiel, [http://e-diss.uni-kiel.de/diss\\_535/](http://e-diss.uni-kiel.de/diss_535/) (Stand: 15.07.2006).
- Schanze, S. & Brückner, K. (2005): Computergestütztes Concept Mapping. Eine Methode zur Unterstützung selbstgesteuerten Lernens. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie* 16 (90): 16 – 19.
- Schecker, H. P. (2002): Physik – Modellieren. Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht. Naturwissenschaftliche Reihe. 5. Aufl., Klett, Stuttgart.
- Schimmel, D., Enting, I. G., Heimann, T. M. L. et al. (1995): CO<sub>2</sub> and the carbon cycle. In: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Senge, P. (1990): The Fifth Discipline: the Art and Practice of the Learning Organization. Doubleday, New York.

- Sommer, C. (2005): Untersuchung der Systemkompetenz von Grundschulern im Bereich der Biologie. Elektronische Dissertation, Christian-Abrechts-Universität, Kiel, [http://e-diss.uni-kiel.de/diss\\_1652/](http://e-diss.uni-kiel.de/diss_1652/) (Stand: 01.12.2006).
- Spiro, R. J. & Jehng, J.-C. (1990): Cognitive Flexibility and Hypertext: Theory and Technology for the Nonlinear and Multidimensional Traversal of Complex Subject Matter. In: Nix, D. & Spiro, R. J. (Hrsg.): Cognition, education and multimedia: Exploring ideas in high technology. Erlbaum, Hillsdale.
- Spiro, R. J., Vispoel, W. P., Schmitz, J. G. et al. (1987): Knowledge Acquisition for Application: Cognitive Flexibility and Transfer in Complex Content Domains. In: Britton, B. C. & Glynn, S.: Executive control processes. Erlbaum, Hillsdale.
- Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. et al. (1989): Multiple analogies for complex concepts: antidotes for analogy-induced misconception in advanced knowledge acquisition. In: Vosniadou, S. & Ortony, A. (Hrsg.): Similarity and Analogical Reasoning. Cambridge University Press, Cambridge.
- Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. et al. (1992). Cognitive flexibility, constructivism, and hypertext: Random access instruction for advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In T. M. Duffy & D. H. Jonassen (Eds.), Constructivism and the technology of instruction: A conservation (pp. 57 – 75). Erlbaum, Hillsdale NJ.
- Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. et al. (1995): Cognitive Flexibility, constructivism and hypertext: Random access instruction for advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In: Steffe, L. P. & Gale, J. E. (Hrsg.): Constructivism in education. Erlbaum, Hillsdale.
- Steinberg, S. (2001): Die Bedeutung graphischer Repräsentationen für den Umgang mit einem komplexen dynamischen Problem. Eine Trainingsstudie. Technische Universität Berlin, Institut für Psychologie, Berlin.
- Steiner, G. (2001): Lernen und Wissenserwerb. In: Krapp, B. W. A. (Hrsg.): Pädagogische Psychologie. Beltz, Weinheim.
- Stern, E., Aprea, C. & Ebner, H. (2003). Improving cross-content transfer in text processing by means of active graphical representation. *Learning and Instruction*.
- Strohschneider, S. (1986): Zur Stabilität und Validität von Handeln in komplexen Realitätsbereichen. *Kognition und Sprache* 5 (1): 42 – 48.
- Strzalka, J. & Strzalka, J. (1986): Perspektivisches Denken und Reflexionen beim Lösen eines komplexen Problems. *Sprache und Kognition* 5 (4): 202 – 210.

- Sweller, J. (1988): Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science* 12 (29): 257 – 285.
- Sweller, J., Merriënboer, J. J. G. van & Pass, E. G. W. C. (1998): Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review* 10 (3): 251 – 296.
- Urhahne, D. (2002): Motivation und Verstehen: Studien zum computergestützten Lernen in den Naturwissenschaften. Waxmann, Münster.
- Vester, F. (1989): Leitmotiv vernetztes Denken. Heyne, München.
- Vester, F. (1997): Neuland des Denkens. dtv, München.
- Vester, F. (2005): Kurzinformation zum Sensitivitätsmodell Prof. Vester®. <http://www.frederic-vester.de/KurzinformationSensitivitaetsmodell.pdf> (Stand: 15.07.2006).
- Vester, F. (2006): Sensitivitätsmodell Prof. Vester®. Das computerisierte Planungsinstrumentarium für komplexe Systeme. <http://www.frederic-vester.de/smtext.htm> (15.07.2006).
- Walser, W. (1992): MOBILE: Ein Modellbildungssystem mit struktureller Modellrepräsentation. In: Wedekind, J. et al. (Hrsg.): Modellbildungssysteme – Konzepte und Realisierungen. CoMet, Duisburg.
- Walser, W. & Wedekind, J. (1991): Konzeption eines graphisch interaktiven Modellbildungssystems. Deutsches Institut für Fernstudien, Tübingen.
- Weinert, F. E. (2001): Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F. E. (Hrsg.): Leistungsmessungen an Schulen. Beltz, Weinheim.

**Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht:**

- Hlawatsch, S., Lücken, M., Hansen, K.-H., Fischer, M. & Bayrhuber, H. (2005): Forschungsdialog: System Erde. Schlussbericht. Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), Kiel.
- Lucius, E. R., Hildebrandt, K. & Lochte, K. (2004): Der globale Kohlenstoffkreislauf als System. *Praxis der Naturwissenschaften – Biologie* 53 (3): 6 – 12.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Sphärenmodell. ....	25
<b>Abb. 2:</b> Systemdefinition. ....	43
<b>Abb. 3:</b> Systemhierarchie. ....	47
<b>Abb. 4:</b> Wirkungsdiagramme (Bayrhuber, H. & Schaefer, G., 1980). ....	52
<b>Abb. 5:</b> Die systemischen Prinzipien der Natur von Frederic Vester (Vester, 1989). ....	57
<b>Abb. 6:</b> Ganzheitliches Problemlösen: Fünf Problemlöseschritte und die jeweilige Konkretisierung von „Vernetzt Denken“ (Gomez & Probst, 1997). ....	59
<b>Abb. 7:</b> Systemische Prinzipien nach Peter Senge (Senge, 1990). ....	61
<b>Abb. 8:</b> Textstruktur der Lernsoftware: Linearer Text; Hypertext. ....	80
<b>Abb. 9:</b> Inhaltsübersicht der Lernsoftware. ....	121
<b>Abb. 10:</b> Startseite der Lernsoftware. ....	127
<b>Abb. 11:</b> Seitenübersicht der Lernsoftware. ....	128
<b>Abb. 12:</b> Glossarfunktion der Lernsoftware. ....	130
<b>Abb. 13:</b> Vollbildfunktion der Lernsoftware. ....	130
<b>Abb. 14:</b> Indexfunktion der Lernsoftware. ....	131
<b>Abb. 15:</b> Vertiefungstexte der Lernsoftware. ....	132
<b>Abb. 16:</b> Beispiel für eine Aufgabenseite mit Aufgabenauswahlmöglichkeit (Beispiel aus den Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ). ....	133
<b>Abb. 17:</b> Beispiel für eine Aufgabenseite mit angezeigter Passworteingabefunktion zum Öffnen einer Aufgabe (Beispiel aus den Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ). ....	134
<b>Abb. 18:</b> Beispiel für eine Aufgabenseite mit Beispiellösungsfunktion (Beispiel aus den Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ). ....	135
<b>Abb. 19:</b> Beispiel für eine Aufgabenseite mit angezeigter Passworteingabefunktion zum Öffnen einer Beispiellösung (Beispiel aus den Lernumgebungen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ). ....	135
<b>Abb. 20:</b> Beendigungsfunktion der Lernsoftware. ....	136
<b>Abb. 21:</b> Kontrollfunktion bei der Beendigung der Lernsoftware. ....	137
<b>Abb. 22:</b> Speicherfunktion der Lernsoftware. ....	138
<b>Abb. 23:</b> Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen <i>A 1</i> und <i>A 2</i> „ohne Diagramme“. ...	141

<b>Abb. 24:</b> Lösungsseite der Lernsoftwareversionen <i>A 1</i> und <i>A 2</i> „ohne Diagramme“ .....	142
<b>Abb. 25:</b> Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen <i>B 1</i> und <i>B 2</i> „mit Diagrammen: keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption“ .....	143
<b>Abb. 26:</b> Lösungsseite der Lernsoftwareversionen <i>B 1</i> und <i>B 2</i> „mit Diagrammen: keine aktive Konstruktion, nur passive Rezeption“ .....	144
<b>Abb. 27:</b> Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“ (I) .....	145
<b>Abb. 28:</b> Zeichenfunktionen innerhalb der Aufgabenseite der Lernsoftwareversionen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“ .....	146
<b>Abb. 29:</b> Lösungsseite der Lernsoftwareversionen <i>C 1</i> und <i>C 2</i> „mit Diagrammen: Anleitung zur aktiven Konstruktion“ .....	147
<b>Abb. 30:</b> Absolute Häufigkeiten des Alters der 102 Versuchspersonen.....	149
<b>Abb. 31:</b> Absolute Häufigkeiten der Leistungskurse (N=71; Schülerinnen und Schüler des 12. und 13. Jahrgangs).....	150
<b>Abb. 32:</b> Relative Häufigkeiten der Leistungskurse (N=71; Schülerinnen und Schüler des 12. und 13. Jahrgangs).....	150
<b>Abb. 33:</b> Absolute Häufigkeiten der beliebtesten und unbeliebtesten Fächer.....	151
<b>Abb. 34:</b> Absolute Häufigkeiten der letzten Zeugnisnoten.....	153
<b>Abb. 35:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen</i> gesamt (Item 1 – 18).....	154
<b>Abb. 36:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen – Faktenwissen</i> (Item 1 – 14) .....	155
<b>Abb. 37:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen – Verständnis</i> (Item 15 – 18).....	155
<b>Abb. 38:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen – Basiswissen</i> (Item 1 – 6, 10 – 11, 13).....	159
<b>Abb. 39:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen – Anwendungswissen</i> (Item 7 – 9, 12, 14 – 18).....	159
<b>Abb. 40:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg gesamt</i> (Item 19 – 31).....	160
<b>Abb. 41:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) .....	161

<b>Abb. 42:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31).	162
<b>Abb. 43:</b> Absolute Häufigkeiten der Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in den Kategorien <i>Lernerfolg – gesamt</i> (Item 19 – 31), <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) und <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31).	162
<b>Abb. 44:</b> Mittelwerte der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .	163
<b>Abb. 45:</b> Absolute Häufigkeiten der erzielten Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44).	167
<b>Abb. 46:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.	170
<b>Abb. 47:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.	172
<b>Abb. 48:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.	172
<b>Abb. 49:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 1a, 1b und 1c vermutet worden ist, dargestellt.	175
<b>Abb. 50:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.	178
<b>Abb. 51:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.	180
<b>Abb. 52:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in der Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt.	180

<b>Abb. 53:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in Hypothese 2 vermutet worden ist, dargestellt. ....	182
<b>Abb. 54:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt. .	185
<b>Abb. 55:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg –Faktenwissen</i> (Item 19 – 22; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt. ....	188
<b>Abb. 56:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse bezüglich der Lerngruppen <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31; ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt. ....	188
<b>Abb. 57:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44; ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 3a und 3b vermutet worden ist, dargestellt. .	191
<b>Abb. 58:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.....	199
<b>Abb. 59:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.....	202
<b>Abb. 60:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.....	202
<b>Abb. 61:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4b und 4c vermutet worden ist, dargestellt.....	206
<b>Abb. 62:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad	

(ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.....	209
<b>Abb. 63:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.....	212
<b>Abb. 64:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.....	212
<b>Abb. 65:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4d und 4e vermutet worden ist, dargestellt.....	216
<b>Abb. 66:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A 1, A 2, B 1, B 2, C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt.....	218
<b>Abb. 67:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A 1, A 2, B 1, B 2, C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt. ....	222
<b>Abb. 68:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A 1, A 2, B 1, B 2, C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt. ....	222
<b>Abb. 69:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A 1, A 2, B 1, B 2, C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 4f und 4g vermutet worden ist, dargestellt. ....	227
<b>Abb. 70:</b> Streudiagramm für die beiden Gruppen <i>Visualisierer</i> und <i>Verbalisierer</i> .....	231
<b>Abb. 71:</b> Mittelwertvergleich der Lernzuwächse der Lerngruppen <i>A ges, B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt. ....	233



<b>Abb. 72:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt. ....	237
<b>Abb. 73:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Unten ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt. ....	237
<b>Abb. 74:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Lernzuwachs/System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach der Lernpräferenz (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 5a und 5b vermutet worden ist, dargestellt. ....	242
<b>Abb. 75:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> in der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt. ....	247
<b>Abb. 76:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> in der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt. ....	252
<b>Abb. 77:</b> Mittelwertvergleich der Lerngruppen <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> in der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach dem Vorwissensgrad (ANOVA). Rechts ist der Zusammenhang, wie er in den Hypothesen 6a, 6b und 6c vermutet worden ist, dargestellt. ....	255
<b>Abb. 78:</b> Itemprofile der latenten Klassen eines 2-Klassen-LCA-Modells für die Datensätze <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) aus Vortest und Nachtest. ....	369
<b>Abb. 79:</b> Itemprofile der latenten Klassen eines 3-Klassen-LCA-Modells für die Datensätze <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) aus Vortest und Nachtest. ....	261

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Kohlenstoffvorkommen im System Erde (verändert nach (IPCC, 2001) und (Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E. et al., 2000)).....	23
<b>Tab. 2:</b> Berechnung der abhängigen Variablen <i>Lernzuwachs/Lernerfolg gesamt</i> , <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Faktenwissen</i> und <i>Lernzuwachs/Lernerfolg – Verständnis</i> (i – Item; n – Anzahl aller Items; m – Anzahl der Faktenwissensitems; a – Itempunktzahl im Vortest; b – Itempunktzahl im Nachtest).....	98
<b>Tab. 3:</b> Design der Studie (UV – unabhängige Variable; AV – abhängige Variable).....	99
<b>Tab. 4:</b> Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe (N = 133). .....	100
<b>Tab. 5:</b> Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe, die bei der Auswertung berücksichtigt wurden (N = 102).....	100
<b>Tab. 6:</b> Zeitlicher Ablauf der Studie.....	101
<b>Tab. 7:</b> Deskriptive Statistiken der Skalen <i>Vorwissen</i> und <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> des Vortests.....	104
<b>Tab. 8:</b> Übersicht über die Items zur Erhebung themenspezifischen Wissens. Kontext: Bio – Biologie; Che/PhyChe – Chemie/Physikalische Chemie; Geo – Geologie; Sys – Systemtheorie allg.; SysErd – System Erde. GKK – Globaler Kohlenstoffkreislauf.....	105
<b>Tab. 9:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariable <i>Computerkenntnisse</i> des Vortests.....	106
<b>Tab. 10:</b> Rotierte Komponentenmatrix der zwölf Items zur Lernpräferenz (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).....	107
<b>Tab. 11:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen <i>Visuelle Lernpräferenz</i> und <i>Verbale Lernpräferenz</i> des Vortests.....	108
<b>Tab. 12:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariablen <i>Visuelle Lernpräferenz</i> und <i>Verbale Lernpräferenz</i> des Vortests.....	108
<b>Tab. 13:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven Kontrollvariable <i>Graphische Kompetenz</i> des Vortests. ....	109
<b>Tab. 14:</b> Deskriptive Statistiken der Skalen <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> und <i>Lernzuwachs/System Erde</i> des Nachtests. ....	111
<b>Tab. 15:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven und motivationalen Kontrollvariable <i>Kognitive Belastung</i> , <i>Aufmerksamkeit</i> und <i>Interesse</i> des Nachtests. ....	112

<b>Tab. 16:</b> Rotierte Komponentenmatrix der 15 Items zu den Variablen <i>Kognitive Belastung</i> , <i>Aufmerksamkeit</i> und <i>Interesse</i> (Die Zuordnung eines Items zu einem Faktor ist durch Fettdruck hervorgehoben.).	113
<b>Tab. 17:</b> Deskriptive Statistiken der kognitiven und motivationalen Kontrollvariablen <i>Kognitive Belastung</i> , <i>Interesse</i> und <i>Aufmerksamkeit</i> des Nachtests.	114
<b>Tab. 18:</b> Deskriptive Statistiken der Skala <i>Erfahrungen mit Systemdiagrammen</i> des Nachtests.	114
<b>Tab. 19:</b> Deskriptive Statistiken der Skala <i>Evaluation</i> des Nachtests.	115
<b>Tab. 20:</b> Deskriptive Statistiken der Subskalen <i>Evaluation des Designs und der bildlichen Struktur</i> und <i>Evaluation der Navigation und der inhaltlichen Struktur</i> des Nachtests.	115
<b>Tab. 21:</b> Rotierte Komponentenmatrix der neun Items der Skala <i>Evaluation: EvalDesign – Evaluation des Softwaredesigns; EvalStruk – Evaluation der Softwarestruktur; EvalNavi – Evaluation der Softwarenavigation</i> (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).	116
<b>Tab. 22:</b> Irrtumswahrscheinlichkeit.	117
<b>Tab. 23:</b> Deskriptive Statistiken für das Alter der Versuchspersonen.	148
<b>Tab. 24:</b> Deskriptive Statistiken für die letzten Zeugnisnoten der Versuchspersonen.	152
<b>Tab. 25:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores in der Kategorie <i>Vorwissen</i> .	156
<b>Tab. 26:</b> Rotierte Komponentenmatrix der 18 Items der Kategorie <i>Vorwissen</i> (Die Zuordnung eines Items zu einem der vier Faktoren ist durch Fettdruck hervorgehoben.).	157
<b>Tab. 27:</b> Deskriptive Statistiken der Kategorie <i>Vorwissen</i> .	158
<b>Tab. 28:</b> Deskriptive Statistiken der Kategorie <i>Vorwissen</i> differenziert nach <i>Basiswissen</i> und <i>Anwendungswissen</i> .	158
<b>Tab. 29:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> .	164
<b>Tab. 30:</b> Korrelationen nach Pearson zwischen den Ergebnissen im Vortest und Nachtest in den Kategorien des Lernerfolgs.	165
<b>Tab. 31:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44).	167
<b>Tab. 32:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach	

Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ). .....	169
<b>Tab. 33:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ; t-Test).....	170
<b>Tab. 34:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ). .....	171
<b>Tab. 35:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> differenziert nach Faktenwissen und Verständnis (t-Test).....	173
<b>Tab. 36:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	174
<b>Tab. 37:</b> Unterschiede der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores bezüglich des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ; t-Test).....	176
<b>Tab. 38:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ).....	178
<b>Tab. 39:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ; t-Test).....	179
<b>Tab. 40:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ). ....	179
<b>Tab. 41:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis (t-Test).....	181
<b>Tab. 42:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven.....	181
<b>Tab. 43:</b> Unterschiede der erreichten Mittelwerte bei den Summenscores des Lernzuwachses der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ; t-Test).....	182

<b>Tab. 44:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen. ....	184
<b>Tab. 45:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31; t-Test).....	186
<b>Tab. 46:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse (Differenzen der Summenscores aus Nachtest und Vortest) in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Faktenwissen und Verständnis sowie nach Lerngruppen.....	187
<b>Tab. 47:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22; t-Test).....	189
<b>Tab. 48:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen zwischen den Lerngruppen in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31; t-Test). ....	189
<b>Tab. 49:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen.....	190
<b>Tab. 50:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen (t-Test). ....	192
<b>Tab. 51:</b> Deskriptive Statistik für die Gruppe <i>Geringes Vorwissen</i> . ....	194
<b>Tab. 52:</b> Deskriptive Statistik für die Gruppe <i>Hohes Vorwissen</i> .....	194
<b>Tab. 53:</b> Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe – Einsatz von Fluss- und Wirkungsdiagrammen. ....	195
<b>Tab. 54:</b> Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe.....	195
<b>Tab. 55:</b> Anzahl der Versuchspersonen pro Lerngruppe – Anzahl der inhaltlichen Perspektiven. ....	195
<b>Tab. 56:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad.....	196
<b>Tab. 57:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach dem Vorwissensgrad sowie dem Faktenwissen und Verständnis. ....	196
<b>Tab. 58:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach dem Vorwissensgrad.....	197
<b>Tab.59:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	198

<b>Tab. 60:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).....	200
<b>Tab. 61:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) und <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	201
<b>Tab. 62:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).....	203
<b>Tab. 63:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).....	204
<b>Tab. 64:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	205
<b>Tab. 65:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores in der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test).....	208
<b>Tab. 66:</b> Deskriptive Statistiken des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	209
<b>Tab. 67:</b> Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). ....	210
<b>Tab. 68:</b> Deskriptive Statistiken des Lernzuwachses in den Kategorien <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) und <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl der inhaltlichen Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	211
<b>Tab. 69:</b> Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg –Faktenwissen</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). ....	213

<b>Tab. 70:</b> Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). .....	213
<b>Tab. 71:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	214
<b>Tab. 72:</b> Unterschiede beim Lernzuwachs in der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). .....	216
<b>Tab. 73:</b> Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen ( <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	217
<b>Tab. 74:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test). .....	219
<b>Tab. 75:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test). .....	219
<b>Tab. 76:</b> Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) differenziert nach Lerngruppen ( <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	220
<b>Tab. 77:</b> Deskriptive Statistiken der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen ( <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	221
<b>Tab. 78:</b> Unterschiede zwischen den Lerngruppen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22; t-Test). .....	223
<b>Tab. 79:</b> Unterschiede zwischen den Lerngruppen bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31; t-Test). .....	224
<b>Tab. 80:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen ( <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	226
<b>Tab. 81:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test). .....	228

<b>Tab. 82:</b> Unterschiede bei den Lernzuwächsen in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) zwischen den Lerngruppen bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test).....	228
<b>Tab. 83:</b> Deskriptive Statistik für die Gruppe <i>Visualisierer</i> .....	230
<b>Tab. 84:</b> Deskriptive Statistik für die Gruppe <i>Verbalisierer</i> .....	230
<b>Tab.85:</b> Deskriptive Statistiken für die Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach der Lernpräferenz.....	232
<b>Tab. 86:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg</i> (Item 19 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test).....	234
<b>Tab. 87:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) und <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach der Lernpräferenz.....	236
<b>Tab. 88:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Faktenwissen</i> (Item 19 – 22) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test). .....	238
<b>Tab. 89:</b> Unterschiede der Mittelwerte der Lernzuwächse in der Kategorie <i>Lernerfolg – Verständnis</i> (Item 23 – 31) zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test). .....	239
<b>Tab. 90:</b> Deskriptive Statistiken für die Summenscores des Lernzuwachses in der Kategorie <i>System Erde</i> (Item 32 – 44) differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach der Lernpräferenz. .....	241
<b>Tab. 91:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Summenscores in der Kategorie <i>System Erde</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach der Lernpräferenz (t-Test). .....	243
<b>Tab. 92:</b> Deskriptive Statistiken für die Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	246



<b>Tab. 93:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich des Einsatzes von Systemdiagrammen ( <i>A ges</i> , <i>B ges</i> und <i>C ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). .....	248
<b>Tab. 94:</b> Korrelationen nach Pearson zwischen <i>Lernzuwachs</i> und <i>Kognitiver Belastung</i> . .....	250
<b>Tab. 95:</b> Deskriptive Statistiken für die Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) und nach dem Vorwissensgrad. ....	251
<b>Tab. 96:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> zwischen den Lerngruppen bezüglich der Anzahl inhaltlicher Perspektiven ( <i>uni ges</i> und <i>multi ges</i> ) differenziert nach dem Vorwissensgrad (t-Test). ....	252
<b>Tab. 97:</b> Deskriptive Statistiken für die Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> differenziert nach Lerngruppen ( <i>A 1</i> , <i>A 2</i> , <i>B 1</i> , <i>B 2</i> , <i>C 1</i> und <i>C 2</i> ) und nach dem Vorwissensgrad.....	254
<b>Tab. 98:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> zwischen den Lerngruppen und den Schülerinnen und Schüler mit hohem bzw. geringem Vorwissen (t-Test). ....	256
<b>Tab. 99:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> zwischen den Lerngruppen, bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen (t-Test). .....	256
<b>Tab. 100:</b> Unterschiede bei den Mittelwerten der Kategorie <i>Kognitive Belastung</i> zwischen den Lerngruppen, bezogen auf Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen (t-Test). .....	257
<b>Tab. 101:</b> Geltung ausgewählter LCA-Modelle. ....	259
<b>Tab. 102:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 2-Klassen-LCA-Modells.....	368
<b>Tab. 103:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest ( <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31)). ....	370
<b>Tab. 104:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln. ....	371
<b>Tab. 105:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachtest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.....	372
<b>Tab. 106:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest ( <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad. ....	372

<b>Tab. 107:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad. ....	373
<b>Tab. 108:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachtest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad. ....	373
<b>Tab. 109:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest (Lernzuwachs/Lernerfolg (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	374
<b>Tab. 110:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Vortest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	375
<b>Tab. 111:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den beiden Klassen im Nachtest für die beiden Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	376
<b>Tab. 112:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten des 3-Klassen-LCA-Modells.....	260
<b>Tab. 113:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest ( <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31)). ....	263
<b>Tab. 114:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.....	263
<b>Tab. 115:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachtest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln.....	263
<b>Tab. 116:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest (Lernzuwachs/Lernerfolg (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad. ....	361
<b>Tab. 117:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad....	362
<b>Tab. 118:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachtest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad. ....	363
<b>Tab. 119:</b> Kreuztabelle zum Klassenwechsel nach gemeinsamer Modellierung von Vortest und Nachtest ( <i>Lernzuwachs/Lernerfolg</i> (Item 19 – 31)) differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	364

<b>Tab. 120:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Vortest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	366
<b>Tab. 121:</b> Mittlere Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu den drei Klassen im Nachtest für die drei Gruppen, die nicht die Klasse wechseln, differenziert nach dem Vorwissensgrad und der Form des Einsatzes von Systemdiagrammen. ....	367
<b>Tab. 122:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss systemischer Darstellungsformen. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	270
<b>Tab. 123:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss mehrperspektivischen Wissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	271
<b>Tab. 124:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Kombination systemischer Darstellungsformen und mehrperspektivischen Wissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	271
<b>Tab. 125:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss des Vorwissens. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	272
<b>Tab. 126:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Lernpräferenz. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	273
<b>Tab. 127:</b> Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zur kognitiven Belastung. „+“ – hypothesenbestätigendes Ergebnis; „-“ – hypothesenwidriges Ergebnis; „+/-“ – teilweise hypothesenkonformes Ergebnis. ....	273
<b>Tab. A - 1:</b> Items zur Erhebung des Computerwissens und Computerinteresses (CompWis – Computerwissen; CompInt – Computerinteresse). ....	352
<b>Tab. A - 2:</b> Items zur Erhebung der Lernpräferenz: VisVorst – Visuelle Lernpräferenz/„Gewohnheitsmäßige Benutzung von bildlichen Vorstellungen im Allgemeinen“; VisProb – Visuelle Lernpräferenz/„Benutzung von bildlichen Vorstellungen beim Problemlösen“; VerbAusdr – Verbale Lernpräferenz/„Guter sprachlicher Ausdruck“; VerbLes – Verbale Lernpräferenz/„Selbsteinschätzung von Leseschwierigkeiten“ .....	353

<b>Tab. A - 3:</b> Items zur Erhebung der graphischen Kompetenz: GraphKomp – „Graphische Kompetenz“ .....	354
<b>Tab. A - 4:</b> Items zur Erhebung der kognitiven Belastung: Anstr – „Anstrengung“; KomplxLI/-LU – „Komplexität der Lerninhalte/-umgebung“; KogAusl – „Geistige Auslastung“; Verstd – „Inhaltliches Verständnis“ .....	355
<b>Tab. A - 5:</b> Items zur Erhebung der Aufmerksamkeit: Aufm – „Aufmerksamkeit“ .....	356
<b>Tab. A - 6:</b> Items zur Erhebung des Interesses: SitInt – „Situationales Interesse“ .....	357
<b>Tab. A - 7:</b> Items zur Erhebung der Erfahrungen mit Fluss- und Wirkungsdiagrammen: Sysdiagr – „Systemdiagramme“ .....	358
<b>Tab. A - 8:</b> Items zur Evaluation der Lernumgebung mit fünfstufiger Antwortskala: EvalDesign – „Evaluation des Softwaredesigns“; EvalStruk – „Evaluation der Softwarestruktur“; EvalNavi – „Evaluation der Softwarenavigation“ .....	359
<b>Tab. A - 9:</b> Items zur Evaluation der Lernumgebung mit offenem Antwortformat: Eval – „Evaluation der Lernumgebung“ .....	360

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, 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 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 vorgelegen hat.

Kristin Hildebrandt

Kiel, 15. Dezember 2006

## **Lebenslauf**

Kristin Hildebrandt

Geburtsdatum 24. Juni 1974

Geburtsort Lübeck

Staatsangehörigkeit deutsch

### **Schule und Studium**

Aug. 1980 – Juni 1984

Besuch der Grundschule Bornhöved

Aug. 1984 – Juni 1993

Besuch der Dahlmansschule in Bad Segeberg

18. Juni 1993

Abitur (Note 2,5)

Okt. 1993 – Feb. 2000

Studium der Fächer Mathematik und Biologie für das gymnasiale Lehramt an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

11. Februar 2000

Erstes Staatsexamen für die Laufbahn der Studienrätinnen und Studienräte an Gymnasien (Note 1,75)

### **Wissenschaftliche Arbeit**

April 1997 – Juli 1998

Wissenschaftliche Hilfskraft am Botanischen Institut an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Juni 1998 – Sep. 1999

Wissenschaftliche Hilfskraft in der Abteilung Biologiedidaktik am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)

März 2000 – Juli 2003

Wissenschaftliche Angestellte in der Abteilung Biologiedidaktik am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)

Seit März 2000

Anfertigung einer Dissertation im Rahmen des BMBF-Projektes „Forschungsdialog: System Erde“

### **Referendariat**

Aug. 2003 – Juli 2005

Studienreferendarin des Instituts für Qualitätsentwicklung an Schulen in Schleswig-Holstein (IQSH) am Gymnasium Humboldt-Schule in Kiel

12. April 2005

Zweites Staatsexamen für die Laufbahn der Studienrätinnen und Studienräte an Gymnasien (Note 1)

### **Berufstätigkeit**

Seit August 2005

Studienrätin z. A. am Gymnasium Elsa-Brändström-Schule in Elmshorn

Kiel, 15. Dezember 2006