

Wie lässt sich ein lernpsychologisch und fachwissenschaftlich
adäquates Teilchenmodell lernen und lehren?

Von der Oberflächenwahrnehmung zur abstrakten
Modellerklärung: Eine kognitionswissenschaftliche
Untersuchung und die Entwicklung eines
computerunterstützten Lernwegs

Von der Pädagogischen Hochschule Heidelberg
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Erziehungswissenschaft (Dr. paed.)
genehmigte Dissertation von
Michael Rohr
aus Trier

Heidelberg, den 17.5.2005

Erstgutachter: Prof. Dr. Peter Buck

Zweigtachterin: Prof. Dr. Manuela Welzel

Fach: Chemie

Tag der mündlichen Prüfung: 8.2.2005

Danke!

Ich danke vor allem Rita und Jan für die Unterstützung und Geduld während der langen Zeit, in der ich mit dieser Arbeit beschäftigt gewesen bin. Ich werde versuchen, die zu großen Beanspruchungen wieder gut zu machen.

Ich danke meinem Betreuer Prof. Dr. Peter Buck für sein großes Verständnis während schwieriger Phasen, für seine konsequente Unterstützung, aber auch für seine immer ehrlichen und kritischen, nachfragenden und erweiternden Fragen und Beiträge zu dieser Arbeit.

Ich danke allen Mitgliedern meiner alten Arbeitsgruppe am psychologischen Institut der Universität Heidelberg für die gute Zusammenarbeit im Themenbereich dieser Arbeit, insbesondere Andreas Rapp, Marion Brunner und Julia Albrecht.

Dank gilt auch den an der Untersuchung beteiligten Schulen, ihren Lehrerinnen und Lehrern, Schülerinnen und Schülern, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Einen ganz besonderen Dank schulde ich meinen Eltern Gertrud und Josef für ihre Solidarität und Unterstützung auch in schwierigen Phasen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick	10
1.1	Einführung	10
1.2	Aufgabenstellung	13
1.3	Fachdidaktische Verortung	14
1.4	Überblick	16
2	Allgemeine Grundlagen: erkenntnistheoretischer und pädagogisch-psychologischer Ausgangspunkt dieser Arbeit	19
2.1	Das Verhältnis dieser Arbeit zu den geisteswissenschaftlich orientierten Positionen der Chemiedidaktik und Psychologie	19
2.2	Erkenntnistheoretische Ausgangsposition der Arbeit: interpretativer Realismus	20
2.3	Die formale Modelltheorie als zugrundeliegende Beschreibungsrahmen für naturwissenschaftliche und psychologische Rekonstruktionen	23
2.4	Grundlegende Positionierung bezüglich des naturwissenschaftlichen Fachinhalts: makroskopische Phänomene und andersweltliche Atomvorstellungen	26
2.4.1	Protokollsätze über Beobachtungen und der Weg zu Modellen und Theorien der atomaren Welt	26
2.4.2	Die phänomenologisch orientierte Sichtweise: Sprung in die Andersweltlichkeit der atomaren Dimension	28
2.4.3	Das quantenmechanische Beschreibungssystem als umfassende Theorie der physikalischen makroskopischen und submikroskopischen Welt	31
2.4.4	Der Zugang zur Teilchenwelt in der Sichtweise dieser Arbeit	33
2.5	Grundlegende Positionen für den die psychologisch-pädagogische Methodik dieser Arbeit	34
2.5.1	Anwendung der erkenntnistheoretischen Position des interpretativen Realismus auf den Gegenstandsbereich des mentalen Teilchenmodells der Stoffe	34
2.6	Das Verständnis der Kognitionswissenschaften in dieser Arbeit: Die schwache Interpretation der Kognitionswissenschaften	37
3	Überblick über den einschlägigen Forschungsstand	38
3.1	Begründung der gewählten Darstellung der fachwissenschaftlichen Zusammenhänge	38
3.2	Das für die ausgewählten Phänomene geeignete fachwissenschaftliche Modell des Gasverhaltens: das van-der-Waals-Modell der realen Gase	39
3.2.1	Die fachwissenschaftlichen Zusammenhänge des van-der-Waals-Modells.	40
3.2.1.1	Eine erste (und didaktisch nachteilige) makroskopische Beschreibung realer Gase: der Virialansatz	40

3.2.1.2	Eine auf einem Teilchenmodell beruhende Korrektur des idealen Gases: die van-der-Waals-Gleichung und ihre vereinfachte Form, der Grundlage des Teilchenmodells dieser Arbeit	41
3.2.2	Lernpsychologisch-didaktische Eignung des van-der-Waals Modells	46
3.2.3	Fachwissenschaftliche Analyse der für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit verwendeten Phänomene	46
3.2.3.1	<i>Fachwissenschaftliche Grundlagen der ersten Aufgabe: die „Diffusion“ verschiedener Gase durch Ton</i>	46
3.2.3.2	Fachwissenschaftliche Grundlagen der zweiten Aufgabe: Brownsche Bewegung von Rauchteilchen in Luft	50
3.3	Das Erlernen des Teilchenmodells: didaktische Untersuchungen, Erklärungen und Konsequenzen	54
3.3.1	Exemplarische Studien zu Alltagsvorstellungen von Gasen und ihr Korrelat zum submikroskopischen Teilchenmodell	54
3.3.2	Exemplarische didaktische Vorschläge zur expliziten Thematisierung der “Andersweltlichkeit” der Teilchenvorstellungen.	56
3.3.2.1	Lernen über Modelle	56
3.3.2.2	Der problemsetzende Ansatz (Vollebregt, 1998)	57
3.3.2.3	Der systemorientierte Ansatz (Buck, 1994, 2004)	57
3.3.2.4	Die Untersuchung von Hollstein (2001)	58
3.3.2.5	Andere Ansätze	59
3.3.3	Die Bedeutung des Lernens über Modelle für den Erwerb des mentalen Teilchenmodells	59
3.4	Wichtige Ergebnisse der Kognitionswissenschaft	60
3.4.1	Grundlegende Annahmen der Kognitionswissenschaft	60
3.4.1.1	Entstehung, zentrale Arbeitshypothese und ihre Annahmen	60
3.4.1.2	Methodologie	61
3.4.2	Modelle zum Erlernen des Teilchenmodells durch den Gebrauch von Analogie	64
3.4.2.1	<i>Modelle aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz</i>	64
3.4.2.2	<i>Syntaktische Analogiebildung: Structure Mapping Theory und Structure Mapping Engine</i>	64
3.4.2.3	<i>Das Kohärenz-Modell der Analogie von Thagard und Holyoak</i>	66
3.4.2.4	<i>Andere Modelle (Weiterentwicklungen des Modells von Thagard und Holyoak, Fallbasiertes Lernen)</i>	68
3.4.3	Stand der Forschung zum Lernen mit multiplen Repräsentationen	70
3.4.3.1	Modelle zur Erklärung des Einflusses der kombinierten Präsentation von Text und Bildern auf den Lernprozess	70
3.4.3.2	Lernen mit Animationen	73
3.4.3.3	Qualitative und quantitative Repräsentationen der Lernaufgaben	73
3.4.4	Befunde zum Erwerb von Bereichswissen aus der kognitiven Entwicklungspsychologie	74
3.5	Schlussfolgerungen für diese Arbeit	75
4	Das Arbeitsvorhaben dieser Dissertation	77
4.1	Erstellung einer Konstruktionsumgebung für ein dynamisches Teilchenmodell	77
4.2	Kognitive Aufgabenanalyse	77

4.3	Empirischer Teil der Arbeit: Überprüfung des Lernprozessmodells und des Lernwerkzeugs	79
4.4	Theoretische Interpretation der Untersuchung zum Lernen mit Analogien	79
4.5	Erwartetes Ergebnis der Arbeit	79
5	Entwicklung einer computerbasierten Konstruktionsumgebung zum aktiven Konstruieren eines dynamischen Teilchenmodells	80
5.1	Grundidee der in dieser Arbeit entwickelten Konstruktionsumgebung	80
5.1.1	Kugelteilchensimulationen als Analogien	81
5.2	Relevante Gesichtspunkte der Theorien des Instruktionsdesigns	82
5.2.1	Sequenzierung	82
5.2.2	Exploration, Eigenaktivität und Motivation	83
5.2.3	Zum Verhältnis von grafischen und textlichen Elementen.	83
5.3	Oberflächengestaltung der Lernumgebung	84
5.4	Technisches Grundproblem einer Simulation des Teilchenmodell in diskreten Schritten	84
6	Aufgabenanalyse	85
6.1	Die Wissensvoraussetzungen des Kugelteilchenmodells als Grundannahmen der kognitiven Aufgabenanalyse	85
6.2	Ein Referenzmodell des Erklärungsgangs von Stoffverhalten durch das Teilchenmodell	86
6.2.1	Experiment und Beobachtung	86
6.2.2	Erklärungsgang für Experimente	86
6.2.3	Erklärungsgang für Beobachtungen	87
6.2.4	Referenzlösung der „Gasdiffusion“ durch einen Tonzylinder in einer qualitativen Repräsentation	88
6.3	Aufgabenanalyse der zweiten Aufgabe: Die Brownsche Bewegung von Rauchteilchen in Luft	93
6.3.1	Referenzlösung der Brownschen Bewegung in qualitativ-wissenschaftlicher Repräsentation	93
6.4	Aufgabenanalyse der dritten Aufgabe: Thermische Expansion von Luft	95
6.4.1	Referenzlösung der thermischen Expansion von Luft in einem Kolbenprober mittels einer qualitativ-wissenschaftlichen Repräsentation	95
6.5	Diskussion der Ergebnisse der Aufgabenanalyse	100
6.5.1	Verhältnis der Teilchenmodellsimulation zum van-der-Waals-Modell der Gase der Aufgabenanalyse	101
7	Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung	102
7.1	Überblick über die Studien	102
7.2	Pilotstudie an 6 Versuchspersonen der 8. Klasse eines Gymnasiums (Einzelfallstudie)	104
7.2.1	<i>Ziele</i>	104
7.2.2	<i>Methode</i>	104
7.2.2.1	Versuchspersonen	104
7.2.2.2	Untersuchungsdesign	105
7.2.2.3	Untersuchungsmaterial	105
7.2.2.4	Auswertungsmethode	107

7.2.3	<i>Ergebnisse</i>	107
7.2.3.1	Wissenstest vor dem eigentlichen Prätest	107
7.2.3.2	Prä- und Posttest	109
7.2.3.3	2 Fallbetrachtungen	109
7.2.4	<i>Diskussion der Ergebnisse für die Untersuchungsziele und Konsequenzen für weitere Untersuchungen</i>	118
7.2.4.1	Methodische Konsequenzen für das Prä-Posttest Untersuchungsdesign	118
7.2.4.2	Ergebnisse des Vorwissenstests	118
7.2.4.3	Ergebnisse der Lernphase und der Einfluss des makroskopischen Vorwissens	119
7.2.4.4	Konsequenzen für weitere Untersuchungen	119
7.3	Untersuchung zur Gewinnung eines Itempools sowie zum Einfluss von Selbsterklärungen und Animationen auf den Lerneffekt	119
7.3.1	<i>Ziel der Untersuchung</i>	119
7.3.2	<i>Methode</i>	120
7.3.2.1	Versuchspersonen	120
7.3.2.2	Untersuchungsdesign	120
7.3.2.3	Operationalisierung	120
7.3.2.4	Auswertungsmethoden	132
7.3.3	Statistische Hypothesen	132
7.3.4	Ergebnisse	133
7.3.4.1	<i>Vorbemerkung</i>	133
7.3.5	Zusammenfassung und Diskussion	145
7.4	Eine Untersuchung zum Einfluss von Alltagsanalogien auf das initiale mentale Teilchenmodell und zu den Modifikationen des initialen Modells durch die Konstruktion eigener Teilchenmodelle in einer computerbasierten Umgebung	146
7.4.1	<i>Ziel der Untersuchung</i>	146
7.4.2	<i>Methode</i>	147
7.4.2.1	Versuchspersonen	147
7.4.2.2	Untersuchungsdesign	147
7.4.3	<i>Ergebnisse</i>	152
7.4.3.1	Inhaltliche Korrektheitskriterien der Test- und der Konstruktionsaufgabe	153
7.4.3.2	Betrachtung der verwendeten Analogien	159
8	Kognitive Modellierung von Analogiebildung und Erklärungsfindung in der Studie 3	164
8.1	Einführung	164
8.2	Charakterisierung der zu simulierenden prototypischen Versuchsperson	165
8.3	Ziele der Simulation	165
8.3.1	Die Bildung analoger Beziehungen zwischen der jeweils gelesenen Geschichte und den Prä-/Posttestaufgaben und Unterschiede zwischen der Analogiebildungen der beiden Aufgaben	166
8.3.2	Die Bildung zusätzlicher analoger Beziehungen nach einer erfolgreichen Lernphase zwischen einer „richtigen“ Lösung der Modellierungsprobleme und den Prä-/Posttestaufgaben.	167

8.3.3	“Richtigere“ Erklärung Testaufgaben im Posttest unter Berücksichtigung der analogen Beziehungen aus beiden Quellbereichen (der jeweils gelesenen Geschichte und der erfolgreichen Bearbeitung der Modellierungsaufgaben). . .	167
8.3.4	Ein Teil der Versuchspersonen überträgt die richtige Lösung der Lernphase nicht.	167
8.4	Annahmen zu den Lern- und Erklärungsvorgängen von ACME und ECHO in dieser Studie	168
8.4.1	Modellbildung durch Mechanismen der Analogiebildung bei andersweltlichen Modellen	168
8.5	Beziehung zwischen Analogiebildung und Erklärungsfindung	170
8.6	Vorgehen beim Erstellen der Simulationen	170
8.6.1	Gliederung in 4 Simulationstypen nach Testaufgaben und in zweiter Linie nach gelesenen Geschichten.	171
8.6.2	Zeitliche Gliederung der Lern- und Testphasen jeder Simulation	171
8.6.3	Umsetzung des Lern- und Testmaterials der Untersuchung in der Simulation	171
8.6.4	Durchführung der Simulationsläufe	172
8.7	Durchführung und Ergebnisse der Modellierung	172
8.7.1	Aufgabe zur Brownschen Bewegung	172
8.7.1.1	Lösen der Aufgabe zur Brownschen Bewegung nach dem Lesen der Ballgeschichte	172
8.7.1.2	Lösen der Aufgabe zur Brownschen Bewegung nach dem Lesen der Fischgeschichte	189
8.7.2	Modellierung der Diffusionsaufgabe	190
8.7.2.1	Modellierung der Diffusionsaufgabe nach dem Lesen der Ballgeschichte	190
8.7.2.2	Modellierung der Diffusionsaufgabe nach dem Lesen der Fischgeschichte 192	
8.8	Zusammenfassung der Ergebnisse der kognitiven Simulationen	192
9	Zusammenfassung und Ausblick	195
9.1	Ergebnisse der Arbeit	195
9.1.1	Ausgangspunkte und Aufgabenstellung	195
9.1.2	Computergestützte Konstruktionsumgebung für das Teilchenmodell	196
9.1.3	Kognitive Aufgabenanalyse	196
9.1.4	Analogiebasiertes Lernmodell für das anfängliche Lernen des Teilchenmodells	197
9.1.5	Empirische Untersuchungsergebnisse zum Lernmodell und zur Lernwirksamkeit der Lernumgebung	197
9.2	Untersuchung und Weiterentwicklung des analogiebasierten Lernmodells durch die Simulation der angenommenen Lernprozesse einer empirischen Studie	198
9.3	Vergleich der didaktischen Folgerungen des Lernprozessmodells mit anderen Ansätzen	198
9.3.1	Der systemorientierten Ansatz von Buck	198
9.3.2	Der Ansatz von Mikelskis-Seifert	200
9.3.3	Der Ansatz von Vollebregt	201
9.4	Sich anschließende Forschungs- und Entwicklungsfragen	202

A Anhang	214
A.1 Untersuchungsmaterial der Studie 1	214
A.1.1 Vortestaufgaben der Studie 1	214
A.1.2 Lernmaterial zur Studie 1	218
A.2 Simulationsläufe mit den kognitiven Modellen ACME und ECHO zur Erzeugung empirischer Befunde des Linkenheim-Experiments	218
A.2.1 Simulationen der Test- und Lernaufgaben zur Brownschen Bewegung	218
A.2.1.1 Gruppe, die die Ballgeschichte las	218
A.2.1.2 Gruppe, die die Fischereigeschichte las	236
A.2.2 Simulationen der Lern- und Testaufgaben zur Diffusion	247
A.2.2.1 Gruppe, die Ballgeschichte las	247
A.2.2.2 Gruppe, die die Fischgeschichte las	264

Kapitel 1

Einleitung und Überblick

1.1 Einführung

Der naturwissenschaftliche Unterricht und mit ihm der Chemie- und Physikunterricht sind in jüngster Zeit in Bewegung geraten. Was in den angelsächsischen Ländern schon ein Vierteljahrhundert Tradition hat - das integrierte Fach „Naturwissenschaft“ oder die weniger konsequente Variante des „fächerverbindenden Naturwissenschaftlichen Unterrichts“ zieht jetzt in die Lehrpläne der deutschen Bundesländer ein - auch im konservativ regierten Süden der Bundesrepublik. Damit einher geht eine Neubesinnung auf die Lehrinhalte der Naturwissenschaften, ebenso wie der Zielsetzungen, der Lehr- und Lernmethoden und der gesellschaftlichen Legitimierung des naturwissenschaftlichen Unterrichts überhaupt.

In diesem Umbruch wird zwar die Anordnung und Auswahl der Lerninhalte große Veränderungen erfahren - von der traditionellen „Hierarchie“ der Inhalte und Begriffe¹ steigt man auf lernsituationorientierte „Module“ um - es wird gleichwohl aber auch Konstanten *geben*, die vom Umbruch nicht tangiert werden und/oder die gar im Zuge des Umbruchs zur größeren Exaktheit und Prägnanz geführt werden: die *Grundbegriffe* eines Fachs und seine *Basiskonzepte*. Unter den Grundbegriffen eines Fachs ist das Gefüge der grundlegenden Begriffe zu verstehen (das durchaus noch verschieden konfiguriert und determiniert sein kann), etwa das Begriffstetraeder der Abbildung 1.1.

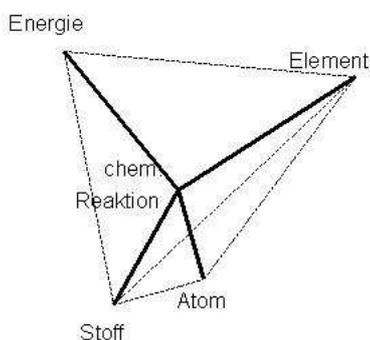


Abbildung 1.1: Begriffstetraeder der Grundbegriffe der Chemie

Unter *Basiskonzepten* werden die in der Wissenschaft (in der „Normal Science“ nach T.S. Kuhn,

¹Vgl. die Chemielehrpläne Baden-Württembergs bis 1994

1970) gängigen Deutungsmuster verstanden, etwa im IPN-Projekt „Chemie im Kontext“ die Basiskonzepte

- das Stoff-Teilchen-Konzept² das Struktur-Eigenschafts-Konzept
- das Donator-Akzeptor-Konzept
- das Energie- (Entropie-) Konzept
- das Konzept des chemischen Gleichgewichts
- das Konzept der Reaktionsgeschwindigkeit³ (Bünder, Demuth & Parchmann 2003).

Sowohl hinsichtlich der Grundbegriffe als auch der Basiskonzepte wird größere Exaktheit und Prägnanz gerade in Zeiten einer stärker betonten Interdisziplinarität und Integration der Lerninhalte notwendig sein, damit die im Lehr-/Lernprozess kollaborierenden naturwissenschaftlichen Disziplinen gegenseitig ihre Beiträge genau einschätzen und aufeinander abstimmen können.

Am Stoff-Teilchen-Konzept als Grundbegriff und als Basiskonzept setzt diese Arbeit an.

Das „Teilchen“ ist Bestandteil solcher Basiskonzepte: in der Chemie im Begriffspaar „Stoff-Teilchen“, in der Physik im Begriffspaar „Welle-Teilchen“. Das Teilchen ist ebenfalls Aspekt des Grundbegriffs „Atom“. Es nimmt also zweifellos eine hervorgehobene Stellung im semantischen Netz beider Fächer ein. Es dürfte darüber hinaus in der Chemie auch deshalb zweifellos zu den konstanten Lerninhalten gehören, weil es mittlerweile geradezu die Definition der Chemie als Fach determiniert. Bei dieser Interpretation der materiellen Welt mit Hilfe des Teilchenkonzepts fällt eine weitere Besonderheit der Chemie auf: Die für die Chemie konstitutive Teilchenvorstellung der Stoffe kann nicht vollständig durch geeignete begriffliche Abstraktionsprozesse aus den beobachtbaren Stoffphänomenen abgeleitet werden, wie z.B. die klassische Kinematik aus den beobachtbaren Bewegungsphänomenen. Sie musste im Laufe ihrer Entstehung und Ausdifferenzierung als eigene, einheitliche Welt mit charakteristischen Verschiedenheiten zur makroskopischen Welt der Phänomene so konstruiert werden, dass sie die gewählten Phänomenbereiche des Stoffverhaltens konsistent erklären kann. Schon bei der einfachen Vorstellungswelt der Kugelteilchen entstehen dabei qualitative Brüche in den Beziehungen zwischen der erlebten Phänomenwelt und der konstruierten Teilchenwelt (z.B. bei den Konzepten der Temperatur und der Aggregatzustände), in der hochdifferenzierten Modellwelt der Quantenchemie treten zusätzliche, weit fundamentalere Brüche z.B. bei den Konzepten der räumlichen Abgrenzung von Teilchen und der Kontinuität wichtiger Grundeigenschaften von Teilchen dazu.

Weil die Teilchenvorstellung in der Chemie diese konstitutive Rolle einnimmt, hat auch die Chemiedidaktik mit den erwähnten grundlegenden qualitativen Brüchen zwischen der subjektiv erlebten Welt der Phänomene und der Vorstellungswelt der Teilchen zu kämpfen, dem Problem der „Andersweltlichkeit“, wie Rüdiger Fladt es nennt (Fladt & Buck, 1996). Eine Vielzahl von empirischen Untersuchungen der letzten Jahrzehnte ist diesem Problem der Andersweltlichkeit im Chemieunterricht nachgegangen. Sie zeigen, dass Schülerinnen und Schüler und Schüler oft sehr große Schwierigkeiten haben, makroskopische Stoffphänomene adäquat durch submikroskopische Teilchen und Teilchensysteme zu erklären (z.B. Brook & Driver, 1989; Brook, Briggs & Driver, 1984; Driver, Squires, Rushworth & Wood-Robinson, 1994; Novick & Nussbaum 1978, 1982; Pfundt, 1981). Diesen Studien folgten Erklärungen, wie solche Schwierigkeiten entstehen können (allgemeine Modelle schlugen u.a. Chi, Slotta & D’Leeuw, 1994 oder Vosniadou, 1994 vor), aber auch Anregungen für eine geänderte Lehr- und Lernpraxis in Schulen (z.B. Buck, 1987, 1994; Fischler & Peuckert, 1999; Vollebregt, 1998, Hollstein, 2001; Mikelskis-Seifert, 2002, Buck, Rehm & Seilnacht, 2004). Es besteht Übereinstimmung, dass das Problem des mangelnden Lernerfolgs beim Erwerb dieses abstrakten Modells bis jetzt noch nicht befriedigend verstanden und der Lernerfolg

²Vgl. die Entwürfe zu den Lehrplänen von 2004

³Es kann durchaus strittig sein, ob **alle** hier aufgelisteten Begriffe alle zu den Basiskonzepten zu zählen sind, das Konzept Stoff-Teilchen-Konzept ist jedoch unstrittig

nicht genügend verbessert wurde. Eines der Erklärungsdefizite besteht darin, dass bisher noch kein kognitionspsychologisches Modell der individuellen Lernprozesse beim Aufbau eines mentalen Teilchenmodells erarbeitet wurde, das die für die Beschreibung individueller Lernprozesse adäquaten inhaltlichen und methodischen Möglichkeiten der Kognitionspsychologie bis hin zur kognitiven Aufgabenanalyse und der Simulation kognitiver Lernprozesse anwendet. Einem adäquaten kognitiven Prozessmodell der Teilchenmodellerwerbs könnten bessere Lernerfolge beim Verstehen und Manipulieren der materiellen Welt auf der Grundlage eines molekularen Stoffverständnisses folgen.

Eine kognitionspsychologische Analyse dieses Lernprozesses ist mit einer eigenen Forschungsmethodik verknüpft, deren Verhältnis zur Herangehensweise der Fachdidaktik in diesem Abschnitt beschrieben werden soll. Zunächst wird in der kognitionspsychologischen Methode eine kognitive Aufgabenanalyse vorgenommen. Eine solche Aufgabenanalyse kann detailliert die Beziehungen zwischen Lernaufgaben, die die Lernziele beinhalten und dem deklarativen und prozeduralen Wissens beschreiben, das zu ihrer Lösung benötigt wird. Ausgehend von den gesetzten Lernzielen wird analysiert, welches allgemeine und spezifische Wissen benötigt wird, um die ausgewählten Lernaufgaben korrekt - d.h. im Erwartungsrahmen *lediglich* des entsprechenden Lehrplanteils - zu lösen. Die Diskussion der Lernziele ist in der kognitiven Aufgabenanalyse damit gegenüber einer fachdidaktischen Herangehensweise verkürzt auf die Frage, wie Lernaufgaben, die den Lernzielen entsprechen, von welchem Vorwissenstand aus erreicht werden können. Wo wird zum Beispiel der Lösungsweg so komplex, dass er für den Einführungsunterricht absehbar zu schwierig wird oder wo wird Wissen vorausgesetzt, das auf dieser Stufe noch nicht erworben wurde? Für unterrichtliche und wissenschaftliche Zwecke können diejenigen Wissensbestandteile identifiziert werden, die als schon beherrscht gelten sollen und diejenigen, die im Verlauf der entsprechenden Unterrichtseinheit erlernt werden sollen. Auch bei einer zukünftig stärkeren Orientierung hin zu situationsorientierten Lernmodulen sollten solche Untersuchungen nicht fehlen, um Überforderungen der Lernenden erkennen und die Module entsprechend modifizieren zu können.

Die weiteren unverzichtbaren Dimensionen einer fachdidaktisch-pädagogischen Lernzielbestimmung - z.B. gesellschaftliche und erzieherische - werden hier nicht berücksichtigt. Dennoch ist die kognitive Aufgabenanalyse auch für andere stärker fachdidaktisch orientierte Annäherungen an das Problem der Teilchenvorstellung eine wertvolle Methode, weil die detaillierte und widerspruchsfreie Analyse einer zu erlernenden Zielfähigkeit auf ihre zugrundeliegenden Wissens Elemente hin (d.h. auf die kognitiven Prozeduren und die nötigen deklarativen Wissens Elemente hin) stringent aufzeigt, welches Wissen vorausgesetzt und welches im Lernprozess einer Unterrichtseinheit erst noch erworben werden muss. Damit ist eine solch detaillierte und formal ausgearbeitete Analyse für eine gründliche Lernzieldiskussion nur *notwendig*, nicht *aber hinreichend*!

Der nächste zentrale Schritt einer kognitionspsychologischen Analyse ist die Erarbeitung eines psychologisch plausiblen Lernprozesses, mit denen die Lernenden die korrekte Lösung der Zielprobleme erlernen. In diesem Lernprozess soll das Wissen ergänzt werden, das nach den Ergebnissen der kognitiven Aufgabenanalyse und deren Vergleich mit dem schon Beherrschten noch aussteht. Für den hier in Frage stehenden Erwerb der Teilchenmodells steht eine Auswahl von ausgearbeiteten Prozessmodellen zur Verfügung, von denen ein geeignetes ausgewählt, für das Erlernen des Teilchenmodell angepasst und dann empirisch überprüft werden kann.

Im wesentlichen unterscheidet sich das hier gewählte kognitionspsychologische Vorgehen von einem fachdidaktischen dadurch, dass insgesamt die Fachdidaktik einen weit gefassten Ansatz vertritt, der auch die schulischen, sozialen und gesellschaftlichen Bedingungen des Lernens umfasst. Demgegenüber betrachtet das kognitionspsychologische Vorgehen die Lernziele im Hinblick auf ihre kognitive Erlernbarkeit sehr detailliert. Insbesondere werden im gewählten kognitionspsychologischen Ansatz weitere Dimensionen der Lernzielbestimmung (z.B. erzieherische und gesellschaftliche) eher ausgeblendet sowie emotional-motivationale, handlungsorientierte und soziale Aspekte des Lernprozesses zunächst ausgeklammert.

Die kognitionspsychologische Methode fokussiert also auf die individuell-kognitiven Aspekte eines letztlich äußerst vielschichtigen Lernprozesses. Diese Beschränkung ist allerdings für Untersuchungen des Teilchenmodellerwerbs solange gerechtfertigt, wie kein akzeptiertes kognitives Lernprozess-

modell entwickelt wurde. Weil die kognitionspsychologische Methodik relativ ausdifferenziert ist, kann die Klärung der „kalten“ kognitionspsychologischen Aspekte einen wichtigen Teil des Fundaments liefern, auf dem abstrakte Lernziel Diskussionen und die Erforschung der weiteren wichtigen Aspekte des Lernprozesses stattfinden können.

Zur Erfassung und Überbrückung des Andersweltlichkeitsproblems wird neben anderen Zugängen häufig die Modellmethode bzw. die allgemeine Modelltheorie (Stachowiak, 1973) herangezogen. Sie spielt beim Teilchenmodellerwerb aus zwei Gründen eine zentrale theoretische Rolle: Erstens weil sie die Beziehungen (und damit auch die qualitativen Brüche) zwischen den verschiedenen „Welten“ - also makroskopischem Phänomenbereich, submikroskopischem, hypothetischem Teilchenmodell, mentalen Schüler- und Lehrermodellen dieser beiden „Welten“ - formal detailliert beschreiben kann. Zweitens spielt die Modelltheorie auch bei den Lernprozessen zum Aufbau eines mentalen Teilchenmodells eine wichtige Rolle - dem Analogielernen und seinem Spezialfall Modelllernen - da diese Lernprozessmodelle unter anderem auf dem Vergleich mindestens zweier komplexer mentaler Strukturen (wie z.B. dem mentalen Teilchenmodell und der Vorstellung über das Verhalten runder Metallscheiben auf einem Lufttisch) mit den begrifflichen Werkzeugen der Modelltheorie beruhen.

1.2 Aufgabenstellung

Ausgehend von dieser Situation verfolgt diese Arbeit folgende Ziele: Durch Anwendung von Methoden und Ergebnissen aus der Wissens- und Entwicklungspsychologie soll das Verständnis des individuellen Lernprozesses beim Erwerb des Teilchenmodells vertieft werden, um so Ansatzmöglichkeiten zu wirksamen Verbesserungen des Chemieunterrichts zu finden. Das so gewonnene Verständnis konzentriert sich auf ein Verständnis der individuellen Lernvorgänge, also pädagogisch-psychologische Aspekte. Wegen des Umfangs dieser Aufgabenstellung werden andere Bereiche einer pädagogischen und didaktischen Betrachtung des Teilchenmodellerwerbs - etwa die Problematisierung der Lernziele, die Betrachtung des Lernumfelds, der Schulorganisation - nicht bearbeitet werden.

Um ein kognitionspsychologisch vertieftes Verständnis des Teilchenmodellerwerbs zu erlangen, soll auf der Basis einer detaillierten Aufgabenanalyse und der relevanten fachdidaktischen und kognitionspsychologischen Literatur ein Lernprozessmodell vorgeschlagen werden, das mit empirischen und theoretischen Untersuchungen geprüft wird.

Zur Untersuchung der Lernprozesse, aber auch zum Gebrauch im Lernprozess wird ein praktisches Resultat dieser Arbeit, ein computergestütztes Konstruktionswerkzeug zum selbständigen Konstruieren von Teilcheninterpretationen einfacher Phänomene vorgestellt werden, das die theoretisch postulierten Lernprozesse unterstützt. Entsprechend dem gewonnenen Lernmodell soll das Programm genutzt werden, um mittels empirischer Untersuchungen des Lernprozesses und -effekts der Schülerinnen und Schüler das Modell des Lernprozesses und seine Umsetzung in die Lernumgebung zu prüfen.

Die Fachdidaktik in pädagogischer Hinsicht würde von einer umfassenden Untersuchung des Erlernens des Umgangs mit dem Teilchenmodell einen umfassenderen Ansatz erwarten: Sie würde etwa den Modus der Informationsbeschaffung durch die Schülerinnen und Schüler im Kontext der unterrichtlichen und schulischen Umgebung erfahren wollen, sie würde wissen wollen, ob und in welchem Verhältnis hier offene und/oder geschlossene Lehr- und Lernformen anstehen und vertraut sind. Sie würde auch die Sozial- und Selbst-Kompetenz bei einer Beschreibung des Lernprozesses mitreflektiert wissen wollen, kurzum: sie wäre nicht zufrieden, wenn sich der Lernprozess bloß auf einen eng umgrenzten kognitiven Lerninhalt und dem dazu stattfindenden spezifischen Lernprozess beziehen würde, wie es in dieser Arbeit der Fall sein wird, weil die Erarbeitung dieser pädagogischen Aspekte über ein kognitives Lernprozessmodell, ein computergestütztes Lernwerkzeug und die entsprechenden empirischen Überprüfungen hinaus den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Insgesamt soll hier also die gründliche Erarbeitung des relativ eng gefassten Themas mit theoretischen und empirischen Methoden im Vordergrund stehen - notwendigerweise auf Kosten einer geisteswissenschaftlichen Reflektion des gesamten pädagogischen Umfelds dieser Themen.

Diese Bemerkungen zum Fokus der Aufgabenstellung sind notwendig, um nicht falsche Erwartungen aufkommen zu lassen: Das zentrale Hauptmotiv dieser Arbeit wuchs aus der Überzeugung, dass Fragen des pädagogischen Überbaus, z.B. nach der bildungstheoretischen Legitimation des Erlernens des Teilchenmodells, der Einbettung des Lernprozesses in eine umfassendere Unterrichtsgestaltung oder auch des erzieherischen Potentials ohne eine theoretische und empirische Erforschung des tatsächlichen individuellen Lernprozesses auf einem ungeklärten lernpsychologischen Fundament steht. Die zahlreichen empirischen Arbeiten zum Erwerb des Teilchenmodells, die von schlechten Lernerfolgen berichten, legen unter anderem ja gerade die Vermutung nahe, dass allgemeine und tiefgreifende Probleme dieses Lernprozesses weitere pädagogische Erörterungen erübrigen, da zu wenige Schülerinnen und den Lernprozess überhaupt erfolgreich bewältigen können und damit eine zentrale Voraussetzung zur frühen Integration des Teilchenmodells in den Chemieunterricht fehlt.

Die vom fachdidaktischen Standpunkt aus wahrnehmbare Einseitigkeit der Aufgabenstellung ist die Schattenseite einer Spezialisierung, die hoffentlich an methodischer und argumentativer Tiefe gewinnt, was sie an Breite verliert und auf diese Weise zur notwendigen Klärung der lernpsychologischen Voraussetzungen erfolgreicher Unterrichtsgestaltung beitragen soll. Im Fortgang der Arbeit wird sich zeigen, dass dieses Vorhaben mit kognitionspsychologischer Methodik nur in einer „Tiefenbohrung“ angegangen werden konnte. Es wird einer oder mehrerer Folgearbeiten bedürfen, um die Konsequenzen für ein breites, bildungstheoretisch reflektiertes Unterrichtsdesign zu erarbeiten.

1.3 Fachdidaktische Verortung

Um die für diese Arbeit relevanten Felder der Fachdidaktik auf einfache Art einzugrenzen, modifiziert die Abbildung 1.2 einen Vorschlag von Barke, Bitterling, Gramm, Hammer, Hermanns, Leibold, Lindemann & Wambach (1984), in dem die Reflektionsfelder der chemischen Fachdidaktik für den Unterricht der Sekundarstufe I schematisch dargestellt werden. Das Schema stellt die Reflektionsfelder vereinfacht als Kreissegmente ohne wechselseitige Bezüge dar. Barke u.a. unterteilen die Fachdidaktik in die Schwerpunktfelder Lernende, Vermittlungsprozesse, fachliche Schwerpunkte und gesellschaftliche Bezugsfelder auf - das wird in der Modifikation der Abbildung beibehalten - nennen aber lediglich Ziele, Medien, Modellvorstellungen, Fachsprache/Symbole und „Alltag und Chemie“ als Inhaltsfelder der Fachdidaktik. Für eine lernpsychologische Betrachtung des Teilchenmodellenerwerbs ist dagegen eine Erweiterung um die Sektoren „Lernen mit multiplen Repräsentationen“ und „Kognitive Aufgabenanalysen“, wie sie von mir eingefügt worden sind, sinnvoll.

Mit diesem angepassten Schema, das auch die Gliederung für das Lehrbuch „Chemiedidaktik heute“ von Barke und Harsch (2001) bildet, wird indirekt eine Standortbestimmung dieser Arbeit vorgenommen: Barke und Harsch sind Fachdidaktiker, die ihr Lehr- und Forschungsgebiet aus der Wissenschaft Chemie ableiten und aus ihr die maßgebenden Bezugskriterien nehmen. Sie sehen den Lernprozess als primär chemiewissenschaftlich orientiert. Der ablaufende Lernprozess wird allerdings nur wenig tiefgehend beleuchtet.

Mit der entsprechenden Erweiterung behandelt die Arbeit folgende Schwerpunkte der Fachdidaktik Chemie:

- Der eigentliche Schwerpunkt betrifft den Lernenden, nämlich die lernpsychologischen Vorgänge beim Erwerb des Teilchenmodells (Naive Schülervorstellungen als Lernvoraussetzungen, kognitive Lernprozesse - insbesondere Lernen durch Analogien - Lernen mit multiplen Repräsentationen, Lernen durch aktive Konstruktion eines Modells). Hierbei bilden die Vorgänge beim Lernen durch aktive Konstruktion eines Modells, beim Lernen mit Analogien und mit multiplen Repräsentationen Überlappungen zum Schwerpunkt der Vermittlungsprozesse. Die kognitiven Aufgabenanalysen überlappen mit dem fachlichen Schwerpunkt, da sie ja kognitive Fertigkeiten identifizieren, die für eine Expertenlösung der Teilchenmodellbildung der ausgewählten Phänomene gebraucht werden. Für die lernpsychologische Betrachtung des

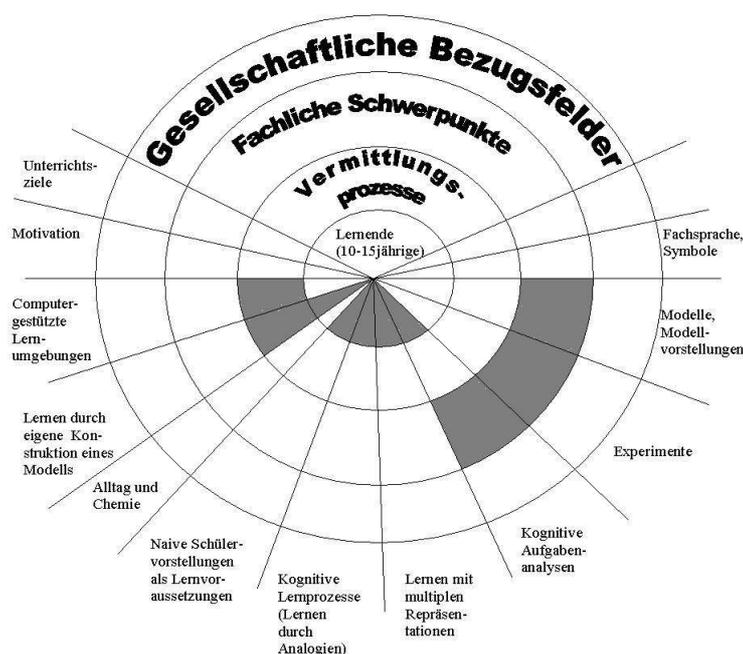


Abbildung 1.2: Felder der Fachdidaktik, die für diese Arbeit unmittelbar relevant sind (schwarz markiert). Modifizierte Abbildung nach Barke, Bitterling, Gramm, Hammer, Herrmanns, Leibold, Lindemann & Wambach, 1984.

Teilchenmodellerwerbs ist damit eine Erweiterung des Diagramms um die Sektoren „Lernen mit multiplen Repräsentationen“ und „Kognitive Aufgabenanalysen“, wie sie von mir eingefügt worden sind, sinnvoll.

- Im Schwerpunkt Vermittlungsprozesse wird in der Arbeit die Vermittlung durch das computergestützte Lernwerkzeug sowie die eigene, aktive Konstruktion eines Teilchenmodells angesprochen.
- Im fachlichen Schwerpunkt spielen das Kugelteilchenmodell, die ausgewählten makroskopischen Phänomene und wie erwähnt die kognitiven Aufgabenanalysen eine Rolle.
- Bezüglich der philosophischen und erkenntnistheoretischen Voraussetzungen spielen fachdidaktische Arbeiten die sich mit den philosophischen Annahmen (Postulate) der Atomtheorie und ihrer Bedeutung für die Behandlung der Teilchenmodelle in Chemieunterricht (etwa Schlöpke, 1987) oder mit ihrem Unanschaulichkeitsproblem befassen (etwa Löffler 1992, 1996; Fladt & Buck, 1996), eine wichtige Rolle. Sie werden in den entsprechenden Kapiteln mit dem Ansatz dieser Arbeit verglichen.
- Gesellschaftliche Bezüge spielen in dieser Arbeit keine direkte Rolle, wenngleich gerade das hier verwendete Teilchenmodell in der Theoriebildung der Chemie und der Thermodynamik eine herausragende Rolle spielt und daher eine kulturalistische Rechtfertigung erhält. Dies sei hier nur erwähnt; ausgeführt wird dieser Gesichtspunkt im Rahmen dieser Arbeit nicht.⁴

⁴Ebenfalls nicht angesprochen wird das erzieherische Potential eines Unterrichts über die in der Physik und Chemie zum klassischen Wissen gehörende Teilchenvorstellung (vgl. hierzu Buck & von Mackensen (1996) S. 128ff oder Müller (1997).

1.4 Überblick

Wie bereits angedeutet, liegen das Thema der Arbeit einerseits im Bereich der physikalischen und chemischen Fachdidaktik. Die Begründung und Auswahl der Lerninhalte können in diesem ersten Ansatz zur Untersuchung der lernpsychologischen Aspekte als durch die entsprechenden Lehrpläne vorgegeben angesehen werden und werden auch nicht weiter problematisiert. Die Fachwissenschaft Chemie kann dafür lediglich die fachwissenschaftlichen Kriterien des Lernerfolgs liefern. Die Aufklärung der Lernprozesse ist andererseits ein psychologisches Problem vor dem Hintergrund fachwissenschaftlicher und fachdidaktischer Kriterien. Bei der Entwicklung verbesserter und neuer Lernmethoden greifen Lernpsychologie und Fachdidaktik stark ineinander, da sowohl lernpsychologische als auch fachwissenschaftlich/fachdidaktische Gesichtspunkte berücksichtigt werden müssen. Die zentrale Stellung der Modellbeziehungen zwischen verschiedenen Bereichen der chemisch-physikalischen und der mentalen Ebenen, ist den verschiedenen Teilen dieser Arbeit gemeinsam. Folgende Modellbeziehungen spielen bei der Analyse des Lernprozesses des Teilchenmodells der Stoffe eine Rolle:

- Modellbeziehungen zwischen dem wissenschaftlichen makroskopischen und dem wissenschaftlichen submikroskopischen Stoffmodell.
- Modellbeziehungen zwischen dem wissenschaftlichen submikroskopischen Teilchenmodell und computergestützten dynamischen Modellsimulationen zur Lernunterstützung.
- Modellbeziehungen bei der lernenden Schülerin zwischen mentaler makroskopischer und mentaler submikroskopischer Repräsentation.
- Modellbeziehungen zwischen diesen mentalen Repräsentationen des Schülers und den entsprechenden wissenschaftlichen Modellebenen.

Die geeignete allgemeine Theorie zur Beschreibung von Modellbeziehungen ist die allgemeine Modelltheorie. Deren allgemeine Formulierungen stellen eine Grundlage sowohl für die Beschreibung der Beziehungen zwischen Phänomenen und Modellen dar, als auch die Grundlage für die Beschreibung von Lernvorgängen, bei denen durch die Herstellung von umfassenden Beziehungen zwischen Beobachtungs- und Modellbereichen neues Wissen gebildet wird.

Für diese Arbeit wird ein kognitionswissenschaftliches Vorgehen gewählt. Der erste Schritt eines solchen Vorgehens ist eine Aufgabenanalyse, die auf die kognitiven Lernprozesse gerichtet ist: In ihr wird ein Rahmenmodell zur Beschreibung des Lernbereichs ausgewählt, die Lernaufgaben werden präzise festgelegt, sowie das zu einer Referenzlösung nötige deklarative und prozedurale Wissen bestimmt. Bei der Bestimmung der Lernaufgaben und einer ausreichenden Referenzlösung spielen sowohl fachwissenschaftlich/fachdidaktische als auch kognitionspsychologische Kriterien eine Rolle (indem ein fachwissenschaftliches Modell ausgewählt wird, das sowohl fachwissenschaftlich/fachdidaktisch akzeptabel als auch nach lernpsychologischen Kriterien für die Anfängerin bewältigbar ist).⁵ Eine Formalisierung der Referenzlösung sorgt dafür, dass die Referenzlösung (die immer nur eine unter unendlich vielen Modelllösungen sein kann) zur Lösung ausreichend und logisch konsistent ist.

Sind die nötigen Wissens Elemente einer Referenzlösung bestimmt, können theoretische Hypothesen darüber erstellt werden, auf welche Art und Weise Anfängerinnen und Anfänger dieses Wissen individuell erwerben: ein nach dem Ansatz dieser Arbeit lernpsychologisches (kognitionswissenschaftliches) Problem. Ein solches Lernmodell (in dieser Arbeit basiert es auf dem Lernen mit

⁵Da die Auswahl der Lernaufgaben aber vor der Analyse ihrer kognitionspsychologischen Grundlagen erfolgen muss, muss bei der Auswahl bereits auf die Ergebnisse der kognitionspsychologischen Analyse vorgegriffen werden. Ein solcher Vorgriff wird später auch bei der Vorstellung der computergestützten Konstruktionsumgebung nötig, weil sie einerseits als Untersuchungsinstrument der psychologischen Analyse vorausgesetzt werden muss, andererseits aber auch Ergebnis der kognitionspsychologischen Analyse für den Einsatz im Unterrichtsprozess sein soll.

Analogien) liefert einen Vorschlag für den Prozess, in dem die genannten Wissens Elemente erworben werden. Die kognitive Entwicklungspsychologie liefert dazu Ergebnisse über den Erwerb bereichsspezifischen Wissens in der Kindheit, die Kognitionspsychologie detaillierte Methoden zur Lernprozessanalyse, aber auch wichtige Anhaltspunkte zu den Beziehungen zwischen multiplen internen und externen Repräsentationssystemen, die gerade beim Lernen des Teilchenmodells eine wichtige Rolle spielen.

Für eine mögliche Umsetzung der theoretischen und empirischen Ergebnisse für die Unterrichtspraxis, aber auch als Forschungswerkzeug möchte ich ein im Rahmen dieser Arbeit erstelltes computerbasiertes Konstruktionswerkzeug vorstellen, das es Schülerinnen und Schüler ermöglicht, eigenständig ihre Teilchenvorstellungen als dynamische Simulationen so zu konstruieren und modifizieren, dass sie angebotenen makroskopischen Phänomenen entsprechen. Das Konstruktionswerkzeug gibt den Schülerinnen und Schülern zusätzlich die Möglichkeit, ihre Konstruktionen auszutauschen und zu diskutieren. Durch diese Erweiterung wird das zugrundeliegende konstruktivistische Lernmodell (dem man natürlich schon stark konstruktivistische Merkmale zuschreiben kann, s. Hollstein, 2001) hin zu konstruktivistischen Lernauffassungen geöffnet, bei denen der soziale Kontext des Lernens eine entscheidende Rolle spielt.

Der weitere Verlauf der Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

- Das zweite Kapitel skizziert die erkenntnistheoretische Position, den interpretativen Realismus nach Lenk (1998).
- Die Abschnitte des dritten Kapitels beschreiben den Forschungsstand mehrerer relevanter Gebiete:
 - Die fachwissenschaftlichen Analysen der benutzten chemisch-physikalischen Inhalte.
 - Die formale Modelltheorie als Beschreibung der verschiedenen Abbildungsbeziehungen, die auf fachwissenschaftlicher und psychologischer Ebene eine Rolle spielen.
 - Die für den Teilchenmodellerwerb relevanten kognitionswissenschaftlichen Lernmodelle.
 - Einige Ergebnisse aus der kognitiven Entwicklungspsychologie.
 - Die wichtigen Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung zu Vorstellungen von Gasen.
 - Zum Schluss des dritten Kapitels werden Schlussfolgerungen aus dem aktuellen Forschungsstand für den Ansatz dieser Arbeit gezogen.
- Im vierten Kapitel folgt das Arbeitsprogramm für diese Arbeit.
- Im fünften Kapitel wird ein computergestütztes Konstruktionswerkzeug vorgestellt, das Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit gibt, selbstständig Teilchenmodelle in Korrespondenz zu makroskopischen Beobachtungen zu konstruieren und diese Modelle in kollaborativen Lernumgebungen zu modifizieren. Varianten dieses Programms werden in den empirischen Untersuchungen eingesetzt, das Programm bildet allerdings auch als eine der unterrichtspraktischen Konsequenzen dieser Arbeit. Die Grundideen dieses Konstruktionswerkzeugs wurden zwischen 1993 und 1998 vom Autor entwickelt (Rohr, 1993, 1995). Im Rahmen eines EU-Projektes, dessen Anträge im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden, wurde sie zusammen mit Andre Hollstein (2001) auf den heutigen Stand gebracht.
- Das sechste Kapitel umfasst die kognitive Aufgabenanalyse, mit der die kognitiven Schritte identifiziert werden, die zur Lösung der Lernprobleme notwendig sind. Im siebten Kapitel werden die empirischen Untersuchungen vorgestellt, die hauptsächlich zur Überprüfung des Lernmodells sowie des Lerneffekts der Konstruktionsumgebung und einiger Einflussfaktoren durchgeführt wurden.
- Das achte Kapitel interpretiert die empirischen Ergebnisse der Untersuchung des Lernmodells mithilfe eines Simulationsmodells zentraler Aspekte der kognitiven Lernvorgänge und versucht so, Voraussetzungen und Folgerungen des Lernprozessmodells deutlich zu machen.

- Zum Schluss wird die Arbeit noch einmal zusammengefasst und mögliche Anschlussforschung diskutiert.

Kapitel 2

Allgemeine Grundlagen: erkenntnistheoretischer und pädagogisch-psychologischer Ausgangspunkt dieser Arbeit

Dieses Kapitel

- beschreibt die Position dieser Arbeit gegenüber den geisteswissenschaftlichen Ansätzen der Chemiedidaktik und Psychologie - insbesondere den phänomenologisch-orientierten Ansätzen.
- stellt die erkenntnistheoretische Position dieser Arbeit, den interpretativen Realismus (z.B. Lenk, 1998) vor.
- skizziert die formale Modelltheorie als zugrundeliegenden Beschreibungsrahmen für die verschiedenen Abbildungsbeziehungen, die eine Rolle spielen, sowohl im naturwissenschaftlichen Feld als auch im Bereich der Kognitionspsychologie.
- beschreibt die Position dieser Arbeit zu grundsätzlichen Problemen naturwissenschaftlicher Beschreibung der makroskopischen und der submikroskopischen Welt.
- zeigt Konsequenzen der modellgestützten Beschreibung psychologischer Lernprozesse für den kognitionspsychologischen Kernteil der Arbeit auf.

2.1 Das Verhältnis dieser Arbeit zu den geisteswissenschaftlich orientierten Positionen der Chemiedidaktik und Psychologie

In den letzten Jahren sind die vorrangig auf molekulare Strukturen zielenden stark fachlich ausgerichteten Ansätze der Chemiedidaktik von eher geisteswissenschaftlich beeinflussten Positionen aus kritisiert worden (z.B. Buck, 1995; Dahlmann, 1998, 1999). Es hat eine Reihe von Versuchen gegeben, den einseitig strukturorientierten Unterricht zu ersetzen (z.B. Buck & Kranich, 1995; Buck & Mackensen, 1996). Diese Arbeit nimmt eine für Chemiedidaktik und Lernpsychologie differenzierte Position zu diesen neueren Ansätzen ein. Für die Chemiedidaktik sieht der Autor die

kulturalistischen und phänomenologisch orientierten Ansätze als einen umfassenden und adäquaten Ausgangspunkt für ein unvoreingenommenes Nachdenken in diesem Bereich an. Sie sind durch ihre Nähe zur Erlebniswelt der Lernenden besonders gut in der Lage, die in der Schulpraxis immer noch dominierende einseitige Ausrichtung auf die Reduktion ausgewählter makroskopischer Stoffphänomene auf zuvor eingeführtes Modellwissen zu erweitern durch ein umfassendes, lebensnah an den Stoffphänomenen orientiertes Lernen. Allerdings muss nach Auffassung des Autors das geisteswissenschaftliche Arbeiten in psychologisch-pädagogischen Bereichen ergänzt werden durch am empirischen sozialwissenschaftlichen Paradigma orientierte Forschungen, um die nach geisteswissenschaftlichen Methoden ausgearbeiteten Unterrichtsvorstellungen nach den Regeln empirischen Arbeitens auf die stattfindenden Lernvorgänge und Lerneffekte hin zu untersuchen (zur Methodik empirischen Arbeit siehe z.B. Bortz & Döring, 2002). Im Bereich der Psychologie sieht der Autor den phänomenologisch orientierten Ansatz¹ als unverzichtbaren, sinnstiftenden Gegenpart des dominierenden empirischen Forschungsparadigmas. Nach Graumann & Metraux (1977) stellt eine phänomenologisch orientierte Psychologie unverzichtbare deskriptive, heuristische und kritische Funktionen als Korrektiv des empirischen Ansatzes zur Verfügung. Um phänomenologisch ermittelte Ergebnisse systematisch am Widerstand der Realität zu prüfen (und den international dominierenden Standards empirischer Erkenntnisgewinnung gerecht zu werden), hält der Autor die empirisch ausgerichtete Forschungstradition trotz ihrer stellenweise noch zu wenig differenzierten Mittel für unverzichtbar. Diese Arbeit bekennt sich also für den Themenbereich des Teilchenmodellerwerbs sowohl zum phänomenologischen sinnstiftenden Verfahren, als auch zum theoretisch erklärenden und empirisch untersuchenden Verfahren der Kognitionswissenschaften, das nach Auffassung des Autors fruchtbare Beiträge zur weiteren Aufklärung der Lernprozesse im Bereich des Teilchenmodellerwerbs liefern kann. Es ist ein Ziel dieser Arbeit, mit ihren kognitiven Methoden und ihren theoretischen wie empirischen Ergebnissen den notwendigen Gegenpart zu den prinzipiell als ebenso notwendig akzeptierten geisteswissenschaftlich orientierten Ansätze (z.B. Buck, Rehm & Seilnacht, 2004) zu unterstützen.

2.2 Erkenntnistheoretische Ausgangsposition der Arbeit: interpretativer Realismus

Die verschiedenen Varianten des Konstruktivismus stellen neben den geisteswissenschaftlichen Ansätzen eine andere philosophische Entwicklung vor allem der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts dar, die nicht nur neue wissenschaftstheoretische Grundsatzdiskussionen in Didaktik und Lernpsychologie entfacht (z.B. Duit, 1995; von Glasersfeld, 1997), sondern diese erkenntnistheoretischen Positionen auch in konkrete didaktische Ansätze weiterentwickelt haben (z.B. von Aufschnaiter & Welzel, 1997; Cobb, Yackel & Wood, 1992). Die verschiedenen, nicht immer miteinander verträglichen Varianten des Konstruktivismus können an dieser Stelle nicht erschöpfend behandelt werden. Die konstruktivistische Position kann aber pauschal als diejenige angesehen werden, die die breiteste Erneuerungsbewegung in den Fachdidaktiken der Chemie und Physik angestoßen hat. Offensichtlich befriedigt sie nicht jedermann, denn es gibt, vor allem in der Chemiedidaktik, deutliche Gegenbewegungen, oder neutral gesprochen, Bewegungen eigener Art, z.B. die Untersuchungen zu und Vorschläge für einen phänomenologischen Chemieunterricht (z.B. Buck & Kranich, 1995; Minssen & Buck, 1986; Soentgen, 1999).

Einen bemerkenswerten Beitrag in eine andere Richtung hat Schummer (1996) geleistet. Er argumentiert in seiner Arbeit: „Realismus und Chemie“ von der philosophischen Realismusvariante des Referenzrealismus aus, während die vorliegende Arbeit der Position des interpretativen Realismus nach Lenk (1998) nahe steht, die besser zu psychologischen Fragestellungen passt. In der Psychologie haben die radikalen Varianten des Konstruktivismus zu Abgrenzungsreaktionen geführt, auch weil der Gedanke der individuellen Wirklichkeitskonstruktion in der Psychologie schon lange präsent ist (Kelly, 1955). Gerstenmaier & Mandl (1995) oder Nüse (1995) haben hier für einen

¹ Siehe zum Beispiel die lesenswerte, ältere Darstellung von Graumann & Metraux, 1977. Eine umfassende Begründung eines an Sinnkriterien orientierten psychologischen Forschungsparadigmas bietet Groeben (1986).

moderaten, kognitiven Konstruktivismus plädiert, der zwar die grundlegende Bedeutung der individuellen Wirklichkeitskonstruktion betont, die radikale erkenntnistheoretische Position des Radikalen Konstruktivismus aber nicht übernimmt. Der interpretative Realismus lässt sich mit dieser moderaten Konstruktivismusvariante vereinbaren. Mit dem interpretativen Realismus liegt damit eine erkenntnistheoretische Grundlage für diese Arbeit vor, Ergebnisse der Kognitionspsychologie zur Modellbildung im naturwissenschaftsdidaktischen Bereich des Teilchenmodells nutzbar zu machen, ohne den fundamentalen Einfluß individuell unterschiedlicher Wirklichkeitsinterpretation (bzw. -konstruktion) zu vernachlässigen.

Lenk geht in seiner interpretativen Erkenntnistheorie davon aus, dass wir bei jedem Erkennen einer Realität und bei jedem Handeln in einer Realität nicht über unsere schemabasierten Interpretationen der Realität hinausgehen können: „Der oberste Grundsatz einer Philosophie der Interpretationskonstrukte ist [...] die ‚Interpretationsimprägniertheit aller Erkenntnis und Handlung‘“ (Lenk, 1998). Der Prozess der Realitätswahrnehmung erzeugt nach Lenk die mentalen Produkte der Realitätswahrnehmung, die Interpretationskonstrukte. Diese umfassende Interpretationsimprägniertheit aller Realitätswahrnehmung bedeutet konsequenterweise, dass auch die Realität selbst ein Interpretationskonstrukt ist, das allerdings auf einer höheren Metaebene des Interpretationsprozesses gebildet wird.

Eine nach Lenk aus theoretischen und lebenspraktischen Gründen gut zu vertretende transzendente Variante dieses interpretationsorientierten Ansatzes nimmt an, dass menschliche Erkenntnis sich auch auf eine Realität außerhalb des Menschen bezieht. In diesem Sinne ist jede Wahrnehmung nicht nur interpretationsimprägniert, sondern auch realitätsimprägniert (Lenk, 1998, S.60ff). Externe Realität und schemabasierte Interpretation beeinflussen unlösbar miteinander verwoben die Produkte des Erkenntnisprozesses, die Interpretationskonstrukte. Obwohl die externe Realität sich in uns ausschließlich in Interpretationskonstrukten niederschlägt, ist es nach Lenk (1998) ein nahe liegender Fehlschluss, die externe Realität einfach durch die Interpretationskonstrukte zu ersetzen und künftig zu vernachlässigen. Nach Lenk (1998, S. 64) vermeidet die Annahme einer externen Realität, auf die sich die Wahrnehmung bezieht, Widersprüche bei der Begründung einer erkenntnistheoretischen Position, welche bei der ausschließlichen Begründung einer erkenntnistheoretischen Theorie durch sich selbst (Selbstanwendung z.B. des Radikalen Konstruktivismus bei seiner eigenen Begründung) leicht entstehen.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass logische Widersprüche in wissenschaftlichen Aussagesystemen vermieden werden sollen. Dem wiederum liegt die Auffassung zugrunde, dass wissenschaftliche Aussagen in Aussagensystemen in einem sozialen Rahmen kommuniziert werden (Groeben & Westmeyer, 1981, S.26) und dass für wissenschaftliche Aussagensysteme die Regeln der Logik gelten (Groeben & Westmeyer, 1981, S.36). Ein Aussagensystem muss bei Gelten der Logik widerspruchsfrei sein, damit aus ihm nicht jede beliebige Aussage gefolgert werden kann, also aus dem Aussagensystem keine praktisch und wissenschaftlich widersprüchlichen Anweisungen gefolgert werden können.

Der Anspruch einer radikalen Selbstanwendung führt leicht zu Widersprüchen in Erkenntnistheorien ohne Bezug auf eine externe Realität und mit konsequenter Anwendung der Erkenntnistheorie auf sich selbst. Nüse (1995, S.272) führt einige solche Gefahren auf. Beispielsweise wird der Radikale Konstruktivismus als szientistische Erkenntnistheorie oft mit wissenschaftlichen Argumenten aus dem Forschungsbereich Neurobiologie begründet, als ob solche neurobiologischen Erkenntnisse sich auf eine empirisch fassbare externe Realität beziehen, was nach der Erkenntnistheorie des Radikalen Konstruktivismus aber nicht möglich ist. Eine ähnliche Gefahr des Selbstwiderspruchs ergibt sich durch Aussagen, dass es zu einer externen Wirklichkeit gar keinen Zugang gibt, obwohl im Rahmen einer solchen Erkenntnistheorie keinerlei Aussagen zu einer externen Realität möglich sind. Eine andere Gefahr szientistischer Erkenntnistheorien mit generellem Geltungsanspruch ist die Übergeneralisierung wissenschaftlicher Begründungen in erkenntnistheoretischen Bereichen, für die Janich (2000, S. 60ff) folgendes Beispiel gibt: Naturwissenschaftlich Forschende müssen bei jeder empirischen Messung beurteilen, ob das verwendete Messinstrument für den jeweiligen technisch-naturwissenschaftlichen Zweck korrekt oder fehlerhaft funktioniert und gegebenenfalls das Messinstrument reparieren oder ersetzen. Dies muss durch eine Setzung der Vernunft und

nicht aufgrund einer anderen naturwissenschaftlichen Theorie entschieden werden, da eine erneute Messung mit einem anderen Messinstrument zu einem infiniten Regress führt. An diesem Punkt basiert also die naturwissenschaftliche Erkenntnismethode unmittelbar auf menschlichem zweckrationalen Handeln, über dessen Erfolg oder Misserfolg nicht allein empirisch entschieden werden kann. Diese Überbeanspruchung der Naturwissenschaft stellt eine Übergeneralisierung radikal konstruktivistischer Argumente auf den wissenschaftstheoretischen Bereich dar.

Obwohl in der Sichtweise des Interpretativen Realismus keine gesicherte Aussage über eine externe Realität gemacht werden kann, weil sich im Ergebnis einer Realitätskonstruktion, dem Interpretationskonstrukt, der Anteil der Interpretationsschemata sich nicht vom Anteil der externen Realität trennen lässt, ist es nach Lenk (1998, S.67) sinnvoll, eine externe Realität anzunehmen, auf die sich Interpretationen beziehen. Dies ist der entscheidende Punkt, den auch andere Fachdidaktiker, die sich auf Lenk berufen (Schummer 1996; Woyke & Scharf 2002) immer wieder ins Feld führen.

Die Bedeutung der Annahme einer externen Welt bzw. der Welteinbettung des Interpretationsprozesses macht folgendes Zitat Lenks (1998, 66f) deutlich: „'Interpretieren' heißt alltagssprachlich oder alltagssprachnah, 'mit Bedeutung versehen', 'verstehen können', 'als bedeutsam *einbetten* in einen größeren Zusammenhang' ('inter' = 'dazwischen'); in diesem Sinne ist eine Interpretation natürlich darauf angewiesen, daß etwas anderes grundsätzlich vorhanden ist, das eben mit Bedeutung versehen wird. Letztlich ist das Interpretieren als Handeln, zumal das *Schemainterpretieren* - nicht im Leeren möglich und nicht bloß im strikten Sinne eine reine, losgelöste ('absolute') Produktion, sondern immer auch eine Rekonstruktion oder Konstitution angesichts eines prinzipiell vorhandenen Kontextes der Welt und einer (sozialen bzw. soziokulturellen) Umgebung. Schematisieren und Schemainterpretieren benötigen einen 'Betreff' ein 'Gegenpart' oder Widerpart, besser: 'Vor- oder Gegenwurf', einen Widerstand, der dafür sorgt, daß das Verfahren nicht im *Leerlauf verbleibt* (Wittgenstein, *PU*, 132, 507). *Das Interpretieren ist in diesem Sinne ein auf grundsätzliche Welteinbettung angewiesener Verhaltensvorgang, bzw. ein Handlungsprozess, ein Prozess der repräsentierenden Konstitution, Konstruktbildung oder gar Rekonstruktion..*“

Der Begriff des Interpretationsschemas für die Wirklichkeitskonstruktion des Individuums ist mit den Ergebnissen philosophischer, kognitionspsychologischer und neurophysiologischer Forschungen vereinbar. Er nimmt an, dass im Prozess der Realitätswahrnehmung Interpretationsschemata auf mehreren hierarchisch gegliederten Stufen arbeiten. Um zu zeigen, in welcher Weise die Schemabildung von physiologischen festgelegten Wahrnehmungsprozessen bis hin zu Metastufen (etwa der Philosophie) bei Lenk in sechs Stufen hierarchisch geordnet sind, werden sie im Folgenden kurz beschrieben (nach Lenk, 1998, S.69ff):

1. Interpretationsstufe 1: praktisch unveränderliche produktive Urinterpretation.
Auf der grundlegenden Interpretationsstufe 1 wirken biologisch fest verdrahtete Musterbildungsmechanismen, z.B. alle reflektorischen Mechanismen oder die physiologisch im Auge festgelegten visuellen Unterscheidungsbildungen zwischen hell und dunkel.
2. Interpretationsstufe 2: gewohnheits-, und gleichförmigkeitsbildende Musterinterpretation (habituelle Form- und Schemakategorialisierung und vorsprachliche Begriffsbildung).
Die zweite Stufe umfasst die vorsprachliche Begriffsbildung, etwa Unterschiede von Formen, Mustern, Strukturen etc. Diese Unterscheidungen sind nicht vollständig biologisch festgelegt, sondern teilweise in der Auseinandersetzung mit den entsprechenden Reizen geformt worden.
3. Interpretationsstufe 3: sozial etablierte, kulturell tradierte, übernommene konventionelle Begriffsbildung.
Hier handelt es sich schon um höhere Interpretationstätigkeiten, nämlich Deutungen durch gelernte, durch Regeln umgrenzte, etwa sozial tradierte, Muster, die bewußt wahrgenommen werden. Diese Begriffe bestimmen unsere Handlungen mit und sind meist schon sprachlich repräsentiert.
4. Interpretationsstufe 4: anwendende, aneignende, bewusst geformte Einordnungsinterpretation.

Die vierte Stufe umfasst nun die Einordnungsinterpretationen, bei denen in Strukturen, Schemata, die bereits sprachlich umschrieben werden können, bestimmte Elemente, z.B. bereits konstituierte, eingeordnet werden: Klassifikation, Subsumierung, Beschreibung, Artenbildung und -einordnung; gezielte Begriffsbildung. Aber auch alle Arten gezielter, ordnender Struktur- und Begriffsbildung repräsentierender Art unter Verwendung sprachlicher oder sprachähnlicher Mittel fallen unter die vierte Stufe.

5. Interpretationsstufe 5: erklärende, "verstehende", rechtfertigende, theoretisch begründende Interpretation oder Rechtfertigungsinterpretation.

Die fünfte Stufe umfasst explizit begründende und theoretische Deutungen, also rechtfertigende Interpretationen. Hier geht es darum, dass nicht nur eingeordnet oder untergeordnet wird, sondern dass argumentative Zusammenhänge zwischen Einordnungen hergestellt, Warum-Fragen gestellt und beantwortet, Rechtfertigungen für Reaktionsweisen, Handlungen usw. vorgenommen werden. Es wird etwas als etwas anderes erklärend interpretiert und nicht nur im schlichten Sinne aufgefasst und beschrieben. Es handelt sich also im Wesentlichen um argumentative, theoretisierende, hypothetisierende und einen intellektuell repräsentierenden Zusammenhang stiftende Auffassungsweisen.

6. Interpretationsstufe 6: erkenntnistheoretische Metainterpretation der Interpretationskonstrukt-methode.

Die erkenntnistheoretischen oder methodologischen Metainterpretationen der Interpretationskonstrukt-methode stehen auf der höchsten Stufe. Sie erfassen die Idee, dass der Mensch seine Interpretationskonstrukte wiederum als Gegenstände höherstufiger Interpretationen analysieren und diskutieren kann. Es handelt sich um die Stufe der Metatheorie oder der Metasprache. Sie ist selbst auch abhängig von dem Grundsatz von der Interpretationsimprägniertheit allen Erfassens.

Auf diese letzten Stufe ist auch die Lenksche Methode der Interpretationen oder der Interpretationskonstrukte selber wieder ein Beispiel dieser Methode selbst. Die Methode lässt sich kumulierend modellmäßig auf sich selber anwenden. Die Beschreibung von Interpretationskonstrukten geschieht also unter der Verwendung von Interpretationskonstrukten.

Empirische, insbesondere experimentelle Methoden der Natur-, Sozial- und Humanwissenschaften sind mit dem interpretativen Realismus vereinbar. Allerdings werden empirische Methoden nicht als bloße Überprüfungen einer unabhängigen Realität gesehen - wenn das auch aus Gewohnheit oft so dargestellt wird -, sondern als interpretationsgelenktes Interagieren mit einer letztlich nicht als solchen erkennbaren Realität (Lenk, 1998, Kap.8). Sobald diese Interaktionen von Interpretationskonstrukten und Realität sich - z.B. durch Modifikation der Interpretationsschemata - zu stabilisieren beginnen, ist in diesem Verständnis die Realität soweit in wissenschaftliches Handeln zur Modifikation von Interpretationsschemata höherer Stufen einbezogen worden, wie es infolge der gegenseitigen Imprägniertheit von Realität und Interpretationsvorgängen möglich ist. Man spricht in solchen Fällen meist von empirischer Bestätigung der theoretischen Konstrukte. Nach dem Verständnis dieser Arbeit sollte eine möglichst breite Interaktion von Realität und interpretationsgestütztem Handeln durch wissenschaftliches empirisches Arbeit angestrebt werden, wenn immer es möglich ist. Dies gilt auch für den Erwerb des Teilchenmodells.

2.3 Die formale Modelltheorie als zugrundeliegende Beschreibungsrahmen für naturwissenschaftliche und psychologische Rekonstruktionen

Die Begriffe Theorie und Modell werden von verschiedenen wissenschaftstheoretischen Positionen unterschiedlich verstanden. Teilweise ist nicht einmal klar, ob der Begriff des Modells oder der Theorie übergeordnet ist. Da der Begriff des Modells hier aber lediglich für naturwissenschaftliche und psychologische Fragestellungen als Werkzeug benutzt wird, schließt sich der Gebrauch

des Begriffs Modell der Diskussion bei Mikelskis-Seiffert (2002, Kap.4) an, die sich wiederum auf Kircher (1995) stützt. Kircher unterteilt Modelle in gegenständliche (zwei- und dreidimensionale Darstellungen) und theoretische Modelle (Theorien, Hypothesen, Erklärungen, Prognosen, fiktive Vorstellungen, vorläufige Vorstellungen). Die wichtigste Darstellung theoretischer Modelle ist die symbolische Darstellung, die wiederum in semiotischer oder semantischer Form auftritt. Semantische Modelle können wiederum mathematischer oder sprachlich-semantischer Form sein. Für diese Arbeit ist weiter der Begriff der Modellanschaulichkeit relevant, den ebenfalls Mikelskis-Seiffert (2002) behandelt hat: Als anschaulich versteht Mikelskis-Seiffert (die sich wiederum auf Vollmer, 1988, stützt) Modelle dann, wenn sie in die Dimensionen des Mesokosmos transformiert werden können (wobei der genauere Begriff Mesokosmos in dieser Arbeit vereinfachend als Makrokosmos im Gegensatz zur submikroskopischen Welt benannt wird).

Im weitaus größten Teil aller unterrichtspraktischen Umsetzungsvorschläge des Chemieunterrichts weltweit werden "Teilchen" als "Teilchenmodell" verstanden. Diese modellbasierte Herangehensweise kann durch zwei allgemeine Eigenarten charakterisiert werden:

- Unter einer makroskopischen Kontinuums-Ebene der Stoffe liegt eine submikroskopisch (nicht beobachtbare) Deutungsebene, das diskontinuierliche Teilchenmodell der Stoffe.
- Da das Teilchenmodell zur Interpretation und Vorhersage von makroskopischen Stoffphänomenen dient, sind makroskopische und submikroskopische Ebene durch Modellrelationen verbunden.

Für die Beschreibung der beiden Ebenen und ihrer Beziehungen bietet sich die allgemeine Modelltheorie an (z.B. Seel 1991, Stachowiak 1973). Sie soll in dieser Arbeit aber nicht nur die Beziehungen von makroskopischen und submikroskopischem Modellbereich erfassen, sondern *auch* die zwischen den wissenschaftlichen Beschreibungen dieser Strukturen und ihrer mentalen Repräsentation bei den Schülerinnen sowie die Beziehungen zwischen dem mentalen Modell einer Schülerin und dem Bild von diesem mentalen Modell bei der Lehrerin. Nach Stachowiak (1973, S. 128ff.) zeichnen sich Modelle durch 3 zentrale Eigenschaften aus:

1. Abbildungsmerkmal: "Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können." (Stachowiak, 1973, S.131).
2. Verkürzungsmerkmal: "Modelle erfassen im allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant erscheinen." (Stachowiak, 1973, S.132).
3. Pragmatisches Merkmal: "Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte - erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende - Subjekte - b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen" (Stachowiak, 1973, S.132).

Die allgemeine Modelltheorie beschreibt die Modellbildung als eine Abbildung von einem Originalbereich in einen Modellbereich. Sie bedient sich dabei der Sprache der Prädikatenlogik. Original- und Modellbereich werden auch als Strukturen bezeichnet. Strukturen bestehen aus Objekten (Dingen, Individuen) und den Relationen zwischen ihnen. Zwischen Original- und Modellstruktur existieren so genannte Modellrelationen, mit denen die Beziehungen zwischen den Strukturen beschrieben werden. Diese Modellrelationen beschreiben die einzelnen Beziehungen zwischen prädikatenlogischen Propositionen, Objekten, Prädikaten und Argumenten.

Bei Erklärungs- und Prognosemodellen wie dem Teilchenmodell der Stoffe sind die Modellrelationen zwischen makroskopischer und submikroskopischer Struktur eineindeutig, d.h. vom makroskopischen Bereich kann eindeutig auf das gewählte submikroskopische Modell geschlossen werden,

umgekehrt gilt das gleiche für Prognosen des makroskopischen Bereich, die aus dem submikroskopischen Bereich eindeutig abgeleitet werden können.

Diese einheitliche, detaillierte und präzise Modellsprache ist die Voraussetzung einer zutreffenden Erfassung von Lernbereich, Lernaufgaben und den Problemen der Repräsentation des Lernbereichs. Sie spielt die gleiche Rolle aber auch für das didaktisch-psychologische Modell des mentalen Zustands der Schülerin. Abbildung 2.1 zeigt die Modelle und Modellbeziehungen, die beim Erlernen von adäquaten Teilchenvorstellungen und der Lernforschung darüber eine Rolle spielen.

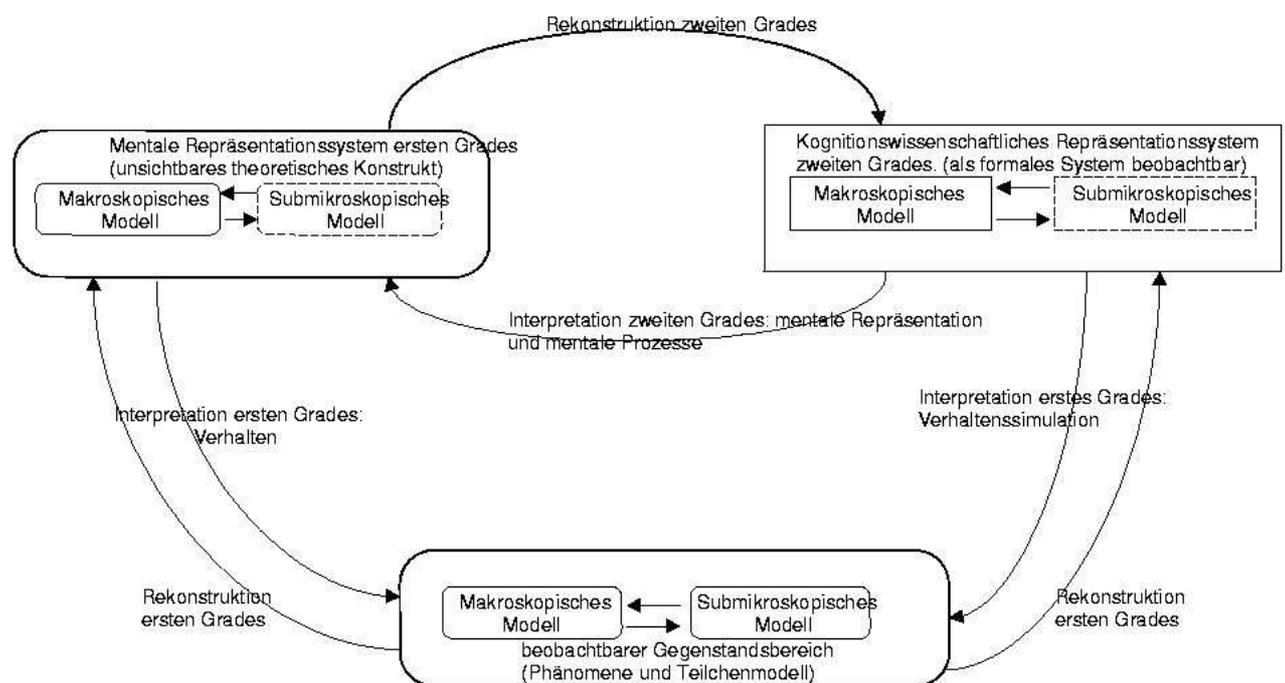


Abbildung 2.1: Repräsentationsebenen bei der Untersuchung des Teilchenmodells

1. Auf der Ebene des Gegenstandsbereichs (unten in Abb.2.1) existieren 2 Modellbereiche: das makroskopische Modell (die objektiven Phänomene) und das submikroskopische Teilchenmodell. Der Übersichtlichkeit wegen sind beide hier nicht weiter aufgelöst in prädikatenlogische Formeln, die den Inhalt beider Bereiche detailliert beschreiben würden. Die beiden Pfeile zwischen ihnen symbolisieren die Menge aller Modellrelationen. Man erkennt 2 Typen von Relationen (die Pfeile sind in ihren Richtungen der Übersicht halber nicht beschriftet): In der einen Richtung wird das makroskopische Modell durch das submikroskopische Teilchenmodell vorhergesagt, in der anderen Richtung wird das submikroskopische Teilchenmodell durch das makroskopische Modell zur Interpretation herangezogen.
2. Die grundsätzlich gleiche Anordnung von makroskopischem und submikroskopischem Modell existiert auch auf der Ebene der mentalen Repräsentation erster Ordnung (also der mentalen

Repräsentation der Schülerin über das makroskopische und das submikroskopische Modell, inklusive der Modellrelationen, links oben in der Abbildung). Allerdings ist hier das submikroskopische Modell unterbrochen gerahmt, um auszudrücken, dass es nicht im mentalen Modell jeder Schülerin enthalten sein muss.

3. Das kognitionswissenschaftliche Repräsentationssystem zweiter Ordnung (rechts oben) ist das Modell einer Kognitionswissenschaftlerin (man könnte dort auch entsprechende die Vorstellung der Lehrerin über das Denken der Schülerin positionieren) über die Repräsentation erster Ordnung der Schülerin.

2.4 Grundlegende Positionierung bezüglich des naturwissenschaftlichen Fachinhalts: makroskopische Phänomene und andersweltliche Atomvorstellungen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Lernen eines naturwissenschaftlichen Modells: Philosophische bzw. erkenntnistheoretische Überlegungen spielen nicht nur bei der Erstellung lernpsychologischer Erklärungen eine Rolle, sondern auch für den fachwissenschaftlichen Lerninhalt, das so genannte Teilchenmodell der Materie. Begriffe wie Phänomen, Modell, System oder Andersweltlichkeit reichen hier in den philosophisch-erkenntnistheoretischen Bereich hinein. Der nächste Abschnitt stellt knapp wichtige Begriffe dieses Felds nach Schlöpke (1987) dar, es folgt eine Diskussion über die phänomenologisch orientierte Sichtweise des Verhältnisses von makroskopischer und atomare Welt, sowie eine kurze Diskussion des Verhältnisses von Alltagssprache und quantenmechanischer Erfassung der physikalischen Welt.

2.4.1 Protokollsätze über Beobachtungen und der Weg zu Modellen und Theorien der atomaren Welt

Schlöpke (1987) hat philosophische Grundlagen des Atombegriffs des Schulunterrichts diskutiert. Der Autor grenzt grundlegend Gesetze von Modellen und Theorien ab. Beide Wissensformen werden durch die Denkfigur der Abduktion (ein auf Charles S. Peirce stammender Begriff) gewonnen, von Schlöpke wird sie Reduktion genannt (der Begriff stammt von Lukasiewicz nach Schlöpke, 1987, S.98). Die Abduktion gewinnt unsicheres allgemeines Wissen, indem sie unbekannte (theoretische) Ursachen aus bekannten Effekten oder Konsequenzen im Umkehrschluss erschließt. Als logischer Schluss ist diese Denkfigur damit nicht zulässig. Allerdings ist die Abduktion heuristisch sehr wertvoll, weil sie die Einführung ganz neuer Ideen zur theoretischen Erklärung eines Wissensbereichs erlaubt.

Gesetze werden durch induktive Verallgemeinerungen von Protokollsätzen gewonnen, die sich nur auf den Inhalt von Protokollsätzen beziehen (Schlöpke, 1987, S.97ff). Damit beschreiben Gesetze empirisch prinzipiell überprüfbare Verallgemeinerungen von Protokollsätzen. Im Gegensatz dazu werden nach Schlöpke in der Chemie Theorien und Modelle (die auf noch abstrakteren philosophischen Überlegungen aufbauen) gewonnen, indem bei der Abduktion zusätzliche theoretische Annahmen gemacht werden, die über die Wissensinhalte der chemischen Gesetze hinaus reichen und dazu dienen, für Gesetze und Protokollsätze möglichst einheitliche Erklärungshintergründe zu liefern.

Schlöpke fasst den durch Abduktion gewonnenen theoretischen Inhalt der Daltonschen Atomtheorie in 6 Postulate (1987, S.95f):

1. Atomistisches Postulat: Es werden Teilchen diskreter Natur (Atome) als unteilbare Einheiten angenommen, die sich gegenseitig ausschließen.
2. Ordnungspostulat: Atome werden in einem Ordnungsmedium (z.B. Raum, Koordinatensystem) beschrieben.

3. Mechanistisches Postulat: Die Ordnung der Atome kann durch Bewegung und zwischen den Atomen wirksamen Kräften verändert werden.
4. Erhaltungspostulat: Atome vergehen und entstehen nicht.
5. Postulat ausbleibender Selbstähnlichkeit: Atome sind Komponenten von größeren Systemen, der Teilchenaggregate. Teilchen und Teilchenaggregate sind unähnlich.
6. Massenpostulat: Atome sind durch ihre Masse unterscheidbar.

Schlöpke schreibt zu diesen Postulaten:

„Die Forderungen 1.-3. sind die klassischen Postulate des philosophischen Atomismus.... In den Postulaten 4.-6. steckt gewissermaßen die naturwissenschaftliche Ausrichtung dieser Atomtheorie.... Das 5. Postulat taucht in der Regel in den Schulbüchern (noch?) nicht auf... seine Notwendigkeit zur Deutung des Befundes, dass die elementaren Stoffe in den Verbindungen nicht erkennbar sind, ist unbestritten.... Wenn es eine Permanenz von hinreichend vielen Eigenschaften dieses Systems zu den Elementen dieses Systems (den Atomen) gibt, stellt sich die Selbstähnlichkeit ein, rotes Kupfer hat dann z.B. rote Kupferatome. Das 5. Postulat fordert aber gerade das Ausbleiben der Selbstähnlichkeit.“ (Schlöpke, 1987, S.96)

Schlöpke nennt Merkmale, die fälschlicherweise von der makroskopischen auf die submikroskopische Welt übertragen werden, abundante Merkmale (darunter fällt beispielsweise die oft angenommene Kugelform der Teilchen, Farbe, Volumen, Oberfläche, Aggregatzustand, Temperatur).

Die Postulate erscheinen mit Ausnahme des 5. Postulats unproblematisch: Das Postulat der ausbleibenden Selbstähnlichkeit gilt nicht für die Eigenschaften, die aus der makroskopischen Welt in die Formulierung der Wellengleichungen der Teilchen übernommen werden. Dies wird beispielsweise bei der Betrachtung der Schrödingergleichung deutlich (z.B. Barrow, 1979, S.76):

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x) + V(x)\Psi(x) = \frac{\hbar}{i} \frac{1}{\phi(t)} \Psi(x)$$

mit

$$\hbar = h/2$$

h = Plancksches Wirkungsquantum = $6,6256 \cdot 10^{-34}$ J s

m = Massensymbol; x = Symbol der x Ortskoordinate

t = Zeitsymbol

$V(x)$ = Symbol der potenziellen Energie in Abhängigkeit von der x -Koordinate

(x, t) = Wellenfunktion in Abhängigkeit von Ort und Zeit

$$i = \sqrt{-1}$$

Aus den in der zeitabhängigen Schrödingergleichung benutzten Symbolen geht hervor, dass die aus der makroskopischen Welt bekannten Variablen der Energie, der Masse, des Orts und der Zeit in die Beschreibung der submikroskopischen Welt übernommen wurden. Damit ist klar, dass das 5. Postulat der Selbstähnlichkeit nicht bezüglich der Existenz dieser Variablen gelten kann. Zwischen verschiedenen Hierarchieebenen gibt es allerdings Unterschiede in der Wertzuweisung der genannten Variablen: Während z.B. der Wert der Masse vieler Atome dem Massenwert der entsprechenden Stoffportion gleich ist, gilt diese Wertgleichheit aufgrund des Massendefekts des Atomkerns nicht für die Summe der Massenwerte der Nukleonen und den Massenwert des Atomkerns. Es ist daher sinnvoller, im 5. Postulat davon zu sprechen, dass das System Teilchenaggregat (Stoff) bezüglich bestimmter Eigenschaften (beispielsweise: Existenz der Variablen Temperatur, Farbe, Aggregatzustand, aber: Wert der räumlichen Ausdehnung) mit seinen Systemkomponenten, den Atomen, selbstähnlich ist, bezüglich bestimmter anderer Eigenschaften (beispielsweise Wert der Masse und Energie, aber: Existenz der Variable räumliche Ausdehnung) hingegen selbstähnlich.

2.4.2 Die phänomenologisch orientierte Sichtweise: Sprung in die Andersweltlichkeit der atomaren Dimension

Diese teilweise Selbstunähnlichkeit zwischen Stoff und den Atomen als Stoffkomponenten ist in den letzten Jahren immer wieder von verschiedenen Autoren thematisiert und in seiner Bedeutung für den Chemieunterricht thematisiert worden. Buck (1994) kritisierte die Verwendung des visualisierten Kugelteilchenmodells im Chemieunterricht in einer Auseinandersetzung mit Hüttner vehement: „**Das Bild führt in die Irre.** Es blendet gerade das entscheidend ‚Andere‘ der atomaren Welt aus. Es verfestigt grob-materielle Fehlvorstellungen. HÜTTNERS Begriffe helfen auch hier weiter: Das Bild ist unkorrekt, irreführend, unprägnant, disparat, schülerfern, nicht lernzielorientiert. Nur den letzten Punkt aus HÜTTNERS Liste muss ich ändern: Es ist anschaulich - und das ist sein Fehler.“ (Buck, 1994, S.413). Zusammenfassend antworteten in ihrer Replik Baar und Christen (1995), dass es zwar anerkanntermaßen Probleme bei der Arbeit mit dem Teilchenmodell gäbe, dass es aber einen großen Wert zur Einführung der Atomvorstellung und seiner schrittweisen Weiterentwicklung hin zu aktuelleren Atomtheorien besäße. 1996 diskutierten Fladt (der hier das Teilchenmodell didaktisch als wertvoll einschätzt) und Buck einige ihrer Auffassungsunterschiede noch einmal. Dabei wurde deutlich, dass Buck als phänomenologisch orientierter Didaktiker Naturbeschreibung anstrebt, „und zwar in einem uns nur denkend zugänglichen Weltbezirk“ (Fladt & Buck, 1996, S.70, siehe dazu auch Buck 1979). Ein Teil der Auffassungsunterschiede zwischen Buck und Fladt kann damit durch die wahrscheinlich unterschiedliche wissenschaftstheoretische Orientierung der beiden Autoren erklärt werden: Buck vertritt eine phänomenologische Orientierung, Fladt scheint einer eher realistischen Auffassung zuzuneigen, die prinzipiell mit dem Begriff des Modells weniger Probleme zu haben scheint. Ein anderer Teil der Auffassungsunterschiede ist tief gehender: Buck will den Lernenden eine möglichst unmittelbare Ahnung von der tief greifenden Andersweltlichkeit (verursacht durch die teilweise strukturell unterschiedlichen Systemebenen) der atomaren Dimension vermitteln, also ohne großen Umweg zu aktuellen naturwissenschaftlichen Sichtweisen kommen, während Fladt sich diesen Vorstellungen in einen schrittweisen Prozess nähern will, während dem Lernende eine Zeit mit dem Teilchenmodell arbeiten müssen, das in der Kugelteilchenvariante kaum verwundertes Innehalten angesichts seiner verspürten Andersweltlichkeit auslösen wird.

Buck (1981, 1994, 1996, 2004) kritisiert allgemein die Verwendung des „technischen“ (d.h. wahrscheinlich des anschaulichen) Modellbegriffs aus seiner phänomenologisch orientierten Position heraus und legt Wert darauf, anstatt einer Projektion von Modellvorstellungen (die oft ausgehend von gegenständlichen Modellen etwas schon Bekanntes beschreiben) auf die atomare Welt einen unmittelbareren Weg in die atomare Welt zu gehen. Buck strebt als phänomenologisch orientierter Didaktiker eine direkte Auseinandersetzung mit der möglichst unverkürzt dargestellten atomaren Welt an, die er als einen für unser denkendes Erleben genauso wie die sinnlich und denkend erlebte makroskopische Umgebung existierenden Wirklichkeitsbezirk begreift. Für einen solchen Zugang zur atomaren Welt ist der Begriff des Modells überflüssig und eher schädlich, weil die Modellübertragungen aus Alltagsbereichen Eigenschaften in die atomare transportieren, die dort nicht hingehören. Buck schreibt am Ende seiner Unterrichtsbeschreibung (2004): „Wir erklären hier durch Zuordnen; wir erklären nicht mit Modellen. Wir ordnen die Erscheinungen in das Spektrum der Weltgegebenheiten ein, wir kaprizieren uns nicht auf Kügelchen oder Orbitale. Wir legen den Akzent auf den Gesamtzusammenhang.“ (Buck 2004, S. 36). Buck verzichtet nach diesem Zitat auf den Gebrauch des Modellbegriffs im Lern-Lehr-Prozess, was wahrscheinlich auf der fachlichen Seite mit den Gefahren der analogen Übertragung des jeweils benutzten Modells auf das andersweltliche diskrete Stoffmodells begründet wird, während er aus seinem phänomenologisch motivierten Verständnis von menschlicher Erkenntnis der reduktionistischen Modellmethode grundsätzlich kritisch gegenüber steht.

Im folgenden soll exemplarisch gezeigt werden, dass auch der systemorientierte Ansatz von Buck (2004) nach der Auffassung dieser Arbeit nicht auf Modellvorstellungen im beschriebenen weiteren Sinne verzichtet. Bei seiner alternativen Einführung in das Teilchenmodell bedient sich Buck des Systembegriffs und der Systemverschachtelung der Welt, in die die stoffliche und die ato-

mare Dimension zwanglos eingeordnet werden kann. Ein System ist im Sinne der Allgemeinen Systemtheorie nach Seiffert (1992) zunächst einmal auf abstrakter Ebene ‚eine Menge (im mathematischen Sinn) von Elementen, zwischen denen Relationen bestehen.‘ (Seiffert, 1992). Dieses Verständnis von Systemen bleibt so allgemein, dass kaum ein Unterschied zu einem allgemeinen Modellbegriff bleibt. Für Buck (z.B. 1981) tritt zumindest dazu, dass in realen Systemen die Elemente des Systems wiederum als Systeme betrachtet werden können. In seiner Betrachtungsweise kann z.B. das Systemganze des Universums als sinnlich und denkend erschließbare Phänomenwelt betrachtet werden. Diese Sichtweise eines Systems beleuchtet den nach Ropohl (zitiert in Seiffert, 1992, S.125) hierarchischen Aspekt der Systembetrachtung, untersucht die beiden anderen aber nicht gleichermaßen genau: Nach Ropohl macht bei der Anwendung der Systemtheorie Probleme, „daß drei unterschiedliche Systemkonzepte vertreten werden, die jeweils einen Systemaspekt in den Vordergrund stellen oder gar verabsolutieren, während doch der Systembegriff in Wirklichkeit alle drei Aspekte umfaßt. Wir meinen das funktionale, das strukturelle und das hierarchische Systemkonzept.“ (Ropohl zitiert in Seiffert, 1992, S.127).

Um Bucks Haltung zur Verwendung von Modellen aus modelltheoretischer Perspektive genauer betrachten zu können, wird Bucks systemorientierter Unterrichtsansatz im Vorgriff auf den didaktischen Teil dieser Arbeit kurz zusammengefasst. Der Unterrichtsansatz von Buck betrachtet das ineinander geschachtelte System der Welt, ausgehend vom Universum über uns selbst bis hin zu den Elementarteilchen, über deren eigene Systemkomponenten Unsicherheit besteht. Die Atome (Teilchen) sind also Bestandteil dieser mit den Lernenden erarbeiteten Systemhierarchie, sie werden nicht mithilfe einer „fernen“ Analogie (eines Modells wie etwa Tischtennisbällen) gewissermaßen unter die Ebene der Stoffe projiziert. Weil er so auf ferne, systemfremde Modelle (Analogien) verzichtet, vertritt Buck wohl im obigen Zitat die Auffassung, dass er die Atome in den Zusammenhang der Systemverschachtelung der Welt einordnet und auf den Einsatz von Modellen im Unterricht verzichtet. Während der Erarbeitung dieser Systemhierarchie werden Unterschiede und Gemeinsamkeiten, aber auch die Perspektivabhängigkeit der wahrgenommenen Verhältnisse von Systemen und ihren Komponenten auf verschiedenen Ebenen betrachtet. Buck schreibt, dass auf diese Weise beispielsweise klar werden kann, warum Atomen keine feste Begrenzung zugeschrieben werden kann: „Wir ‚verstehen‘ nun vieles, was uns vorher rätselhaft war: Dass Atome nicht als Kugeln mit einer Außenhaut vorgestellt werden dürfen. Das ist so leicht zu verstehen, wie wir auch sagen können: der Radius der Erde hängt davon ab, wie man sie definiert. Soll die Luft nicht mitgezählt werden, dann ist er am Äquator 6378,388 km. Aber die Luft gehört ja zu Erde! Sollen 15 km noch dazu? Ist der Radius also 6393,388 km? (So hoch fliegen Flugzeuge, die ja auch zur Erde dazugehören!). Aber warum dann nicht 340 km dazu? So hoch flog die Discovery-Fähre am 18.3.2001 und in diesem Bereich kreisen die Satelliten, die doch unzweifelhaft zum System Erde gehören. Aber warum dann nicht noch 3800000 km dazu, denn der Mond ist ja sozusagen auch ein Satellit? Das leuchtet ein und wirft zugleich ein erklärendes Licht auf die Andersartigkeit der Atome und Elementarteilchen.“ (Buck, 2004, S.34).

Anhand dieses Zitats soll nun Bucks Unterrichtsvorschlag aus der Perspektive der Modelltheorie betrachtet werden. Im Vergleich zu Buck (etwa 2004) wird in der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung der Inhalte und des Lernprozesses der Modellbegriff der Allgemeinen Modelltheorie benutzt, auch das dynamische Teilchenmodell als Produkt der aktiven Konstruktion wird als Modell verstanden. Entsprechend der oben verwendeten Modelldefinition besteht ein Modell aus einem Modell- und einem Originalbereich, die durch Modellrelationen verknüpft sind. Modell- und Originalbereich sind damit auf einer hohen Abstraktionsstufe angesiedelt, weil sie aus logischen Strukturen bestehen, d.h. beide enthalten gemäß der Prädikatenlogik Objekte und Relationen zwischen ihnen. Dieser Modellbegriff lässt Raum für unterschiedlich weit gefasste Modellstrukturen und für zusätzliche inhaltliche Zusammenhänge zwischen Modell- und Originalstruktur (ihre Position in der gleichen Systemhierarchie). Bucks Zitat benutzt in der Sichtweise dieser Arbeit einen besonders komplexen Modellbereich, der verschiedene perspektivabhängige Varianten des Systems Erde und seiner Systemkomponenten inklusive der Beziehungen zwischen System und Komponenten umfasst. Viele Unterrichtsansätze für das Teilchenmodell nehmen demgegenüber einen relativ einfachen Modellbereich wie z.B. das Billardkugelmodell an und übertragen seine Eigenschaften

oft unkritisch auf die atomare Ebene. Der Modellbereich hängt bei Buck zudem mit dem Originalbereich derart zusammen, dass Modell- und Originalbereich auf unterschiedlichen Stufen der gleichen Systemhierarchie stehen. Zusammenfassend wird also nach der hier vertretenen Auffassung in Bucks obigem Zitat in seinem Unterricht der Modellbereich mit den verschiedenen Sichtweisen des Systems Erde und seiner Komponenten mithilfe einer relativ nahen Analogie (d.h. Modellrelation) mit dem Originalbereich (dem System Atom und seinen Systemkomponenten inklusive den Beziehungen zwischen dem System und seinen Komponenten) in Beziehung gesetzt.

Wenn auf diese Art Aussagen über das System Erde auf das System Atom übertragen werden, liegt es aus der modellbasierten Sichtweise nahe, die übertragenen Zusammenhänge zu prüfen: Welche dieser genannten Systemeigenschaften können übertragen werden, welche Übertragungen sind unzulässig? Die verschiedenen Sichtweisen des räumlichen Umfangs des Systems Erde (mit oder ohne Lufthülle, mit oder ohne künstlichen Satelliten, mit oder ohne Mond) beziehen sich darauf, inwieweit nach Kriteriumseigenschaften wie der Wirkung der Schwerkraft der Erde oder der Grenze des massiven Erdkörpers oder der Grenze der Lufthülle entschieden wird, ob ein Körper wie der Erdkörper selbst, die Lufthülle oder der Mond eine Systemkomponente des Systems Erde darstellt. Wenn diese Sichtweisen bezüglich eines Atoms klarmachen sollen, dass die Systemgrenze eines Atoms wie im Fall der Erde nicht scharf gezogen werden kann, dann fällt es schwer zu sehen, wie das ohne die Übertragung der Kriteriumseigenschaften Grenze der soliden Masse, (luftartige?) Hülle um das Atom und Schwerkraftwirkung auf das Atom geschehen soll. Die Schwerkraft kann dabei relativ sinnvoll per Analogie auf die elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen Atomkern und Elektronen übertragen werden, diese Analogie macht aber die Andersweltlichkeit des Atoms nicht klarer. Die Übertragung der Eigenschaft der Abgrenzbarkeit der soliden Masse erhellt ebenfalls nicht die Andersweltlichkeit des atomaren Bereich, wurde aber von Buck selbst und vielen anderen Autorinnen und Autoren kritisiert, weil sie „Fehlvorstellungen“ induziert. Die Übertragung der Eigenschaften der Lufthülle wird hier nicht weiter betrachtet. Aus der Sichtweise des hier vertretenen modelltheoretischen Ansatzes ist es deshalb nicht verständlich, dass Buck am Ende der obigen Zitats meint, dass die Möglichkeit verschiedener Sichtweisen auf den räumlichen Umfang des Systems Erde ein „erklärendes Licht auf die Andersartigkeit der Atome und Elementarteilchen“ wirft. Wie soll die Perspektivabhängigkeit der räumlichen Systemgrenze der Erde die Perspektivabhängigkeit der räumlichen Grenze des Systems Atom und gleichzeitig ihre Andersweltlichkeit, d.h., ihre teilweise grundsätzlich andere Strukturiertheit aufzeigen?

Zusammenfassend ist hier für Autoren, die das Kugelteilchenmodell unter anderem aus einem umfassenden fachlichen Anspruch heraus kritisieren und einen fachlich geeigneteren Zugang fordern (z.B. Buck 1994; 2004; Buck, Rehm, Seilnacht 2004; Müller, 1994 bzw. Rehm, 2004; Schlöpke 1987) eigentlich die didaktisch sehr schwierige Situation entstanden, von vorneherein den Lernenden einen unverstellten Blick auf die fachlich richtige Quantenmechanik zur Beschreibung auch der makroskopischen Wirklichkeit zu eröffnen, ohne die mathematischen Beschreibungsweisen zur Verfügung zu haben, die ja eigentlich die Andersweltlichkeit gegenüber den anschaulichen makroskopischen Beschreibungsweisen erst aufzeigen.

In der Perspektive dieser Arbeit kann deshalb auch der Ansatz von Buck nicht das grundsätzliche Problem der Bildung einer andersweltlichen Atomvorstellung lösen: Denn wenn der räumliche Umfang des Systems Atom durch eine prinzipiell örtlich unbegrenzte Wellenfunktion beschrieben wird, die den anschaulich unbegreifbaren Dualismus von Wellen und Korpuskeln impliziert, wird kaum ein den Lernenden bekanntes Modellsystem zu finden sein, dessen Umfangsbestimmung ohne Modellfehler auf das System Atom mit seiner räumlich unbegrenzten Wellenfunktion übertragen werden kann. Diese Kritik am Buckschen Unterrichtsansatz soll nicht seine innovative Wahl eines Systems und seiner Komponenten als Modellwelt entwerten - diese Wahl wird auch im Beschreibungssystem dieser Arbeit als wertvoll und produktiv für den allmählichen Aufbau der „richtigen“ Teilchenvorstellung angesehen - sie soll vielmehr deutlich machen, dass der modelltheoretische Ansatz eine präzise Beschreibung des Gegenstandsbereichs und der entsprechenden Lernvorgänge ermöglicht, mit dem die unvermeidlichen Übertragungsfehler bei der Modellbildung im atomaren Bereich identifiziert werden können. Die modellbasierte Analyse des Buckschen Ansatzes macht aber auch klar, dass der systemorientierte Ansatz prinzipiell vor dem gleichen Problem steht wie die

anderen Ansätze: Welcher den Schülerinnen und Schülern zugängliche Realitätsbereich kann dazu benutzt werden, ein „erklärendes Licht auf die Andersartigkeit der Atome und Elementarteilchen“ zu werfen? Weil nach der Auffassung dieser Arbeit Modellfehler beim analogenbasierten Aufbau des Teilchenmodells unvermeidbar sind, wurden hier die klaren Modellbildungsfehler beim Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung in Kauf genommen, da ein „richtiges“ Modell in dieser Sichtweise sowieso nie in einer Unterrichtseinheit mithilfe der „richtigen“ Modellvorstellung, sondern nur in einem langwierigem, differenzierenden und über Jahre dauernden Lernprozess aufgebaut werden kann.

Während eine phänomenologische Sichtweise das bewusste Erleben als Zugang zu den Wissenschaften schon fast ausschließlich in den Mittelpunkt stellt, sieht der interpretatorische Realismus und das darauf aufbauende kognitive Verständnis der Lernvorgänge in dieser Arbeit zwar die zentrale Funktion bewussten Erlebens und respektiert auch die besondere Stellung bewussten Erlebens gerade in einem pädagogischen Kontext. Allerdings lässt die interpretativ realistische Position dieser Arbeit zu, dass eine wissenschaftliche Perspektive gegebenenfalls die phänomenologische Auffassung der Zentralität bewussten Erlebens verlassen und sich z.B. auf eine abstrakte Modellvorstellung als Bezugspunkt einlassen kann. Von dieser aus können Phänomene wie z.B. unbewusste Denkvorgänge, analoges Denken oder auch quantenmechanische Beschreibungen der Welt auch formal beleuchtet werden. Ein vom bewussten Erleben entfernter Standpunkt wird in dieser Arbeit in Strukturen von kohärenten, bedeutungsvollen Aussagenmengen beschrieben, d.h. in Theorien bzw. Modellen. Entsprechend ist nach dem Verständnis dieser Arbeit der Modellbegriff nicht auf gegenständliche Modelle beschränkt, sondern wird abstrakt im Sinne der Allgemeinen Modelltheorie (s. Kap. 3) als logische Struktur, bestehend aus Aussagen und ihren Relationen verstanden, die auf einen Anwendungsbereich angewendet wird. (siehe z.B. Mikelskis-Seiffert, 2002). In diesem Sinne kann auch der Tesseract mit der unvorstellbaren Eigenschaft der 4. Dimension als Modell für die atomare Welt gelten, wobei eben gegebenenfalls nur die Eigenschaft der Unvorstellbarkeit der 4. Dimension auf die atomare Welt übertragen wird (Buck, 1992). Dieses sehr allgemeine Modellverständnis hat im Rahmen dieser Arbeit den Vorteil, dass jede mit den Mitteln der Prädikatenlogik beschreibbare Struktur als Modell für den atomaren Bereich dienen kann, d.h. es können anschauliche wie auch unanschauliche Modelle verwendet werden. Zusätzlich kann ein Modell im Sinne von Schloppe (1987) gegenüber Gesetzen dadurch ausgezeichnet werden, dass es Inhalte enthält, die nicht Bestandteil von Gesetzen bzw. Protokollsätzen sind, sondern durch Abduktion dem empirischen Wissen über den jeweiligen Gegenstandsbereich neu hinzugefügt wurden.. Der Ansatz dieser Arbeit lässt zu, dass theoretische Aussagegebilde versuchsweise Perspektiven jenseits des Bewusstseins einnehmen können, dass Theorien und Modelle detailliert in logischen Strukturen formuliert werden und dass jede zur Einführung der atomaren Welt herangezogene Vorstellung auf Modellfehler überprüft werden kann.

2.4.3 Das quantenmechanische Beschreibungssystem als umfassende Theorie der physikalischen makroskopischen und submikroskopischen Welt

Die Problematik der teilweisen Selbstähnlichkeit des Systems Teilchenaggregat (Stoff) mit den Systemkomponenten Atomen birgt aber über diesen Punkt hinaus eine weitere, in der Sicht des Autors grundlegendere Schwierigkeit: In der Literatur zum Problem der Selbstähnlichkeit und seinen didaktischen Konsequenzen (z.B. Buck 1991, 1994; Buck, Rehm, Seilnacht, 2004) wird meist davon gesprochen, dass es einen „Sprung zu den Atomen“ gibt, als gälten in fachlicher Hinsicht die Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik nur im submikroskopischen Bereich. Dies gilt wahrscheinlich aus einer phänomenologisch orientierten Herangehensweise im Bereich der Schulchemie, wenn nämlich in didaktischer Absicht von der makroskopischen Ebene auf die nur noch denkend erfahrbare atomare Ebene gewechselt wird. Phänomenologisch gesehen sind also Phänomene der makroskopischen Welt direkter im bewussten Erleben und Denken erfassbar, während die atomare Welt letztlich nur denkend erfasst werden kann und dieses Denken zu mathematischen Strukturen führt, die keiner makroskopisch anschaulichen Vorstellung mehr entsprechen. Aus naturwissen-

schaftlicher, d.h. aus der von Buck (z.B. 1994) oder Rehm (2004) oft zitierten fachlichen Sicht, ist aber die Quantenmechanik ein Beschreibungssystem der Physik, das prinzipiell sowohl für den makroskopischen als auch für den submikroskopischen Raum gilt und insofern die makroskopische Newtonsche klassische Mechanik als Grenzfall für diejenigen Größenordnungen umfasst, in denen das Plancksche Wirkungsquantum h wegen seines niedrigen Wertes keine praktische Rolle mehr spielt (z.B. Heisenberg, 1959, S.78). Der Welle-Teilchen-Dualismus gilt also aus physikalischer Sicht nicht nur in den atomaren Dimensionen, sondern prinzipiell auch in der Welt unserer Wahrnehmung, obwohl die umfassende quantenmechanische Beschreibungsweise in unserer Alltagswelt für die meisten Kommunikationssituationen unnötig ist. In der Chemie ist dagegen die Quantenmechanik zur Beschreibung der atomaren Dimensionen oft unverzichtbar, hier führt die Newtonsche Mechanik oft nicht weiter.

Es stellt sich damit die schwierigere Frage, wie das Verhältnis von Alltagssprache und Sprache der Quantenmechanik beschaffen ist. Ist hier der Modellbegriff vielleicht nützlicher als der phänomenologische Ansatz? Denn wenn die andersweltliche quantenmechanische Sichtweise nicht nur für die atomare sondern auch für die Erfahrungswelt gilt, die atomare Welt als real und mit quantenmechanischen Formulierungen beschreibbar angenommen wird, dann stellt sich für phänomenologische Sichtweisen die Frage, in welchen Verhältnis das bewusste Erleben des physikalischen Makrokosmos und die naturwissenschaftlich umfassendere quantenmechanische Beschreibung dieses physikalischen Makrokosmos stehen.

Zu diesen Problemen schreibt Weizsäcker: „Die sog. exakte Wissenschaft kann niemals und unter keinen Umständen die Anknüpfung an das, was man die natürliche Sprache oder die Umgangssprache nennt, entbehren. Es handelt sich stets nur um einen Prozess der vielleicht sehr weit getriebenen Umgestaltung derjenigen Sprache, die wir immer schon sprechen und verstehen. Und eben deshalb ist die Vorstellung einer vollkommen exakten Sprache zumindest für solche Wissenschaften, die sich, wie man sich ausdrückt, mit realen Dingen beschäftigen, eine reine Fiktion“ (Weizsäcker, 1982, S.65). Und an anderer Stelle: „Ich möchte die Vermutung wagen, daß hier folgende Ausdrucksweise angebracht wäre: Es gibt einen immer schon erschlossenen Bereich, in dem man sich gut genug verständigen kann, um - auf das dort herrschende Verständnis aufbauend - neue Bereiche zu erschließen. Der schon erschlossene Bereich, in dem wir uns verständigen können, ist uns erschlossen nicht *nur*, aber *weitgehend* durch die Sprache, die wir immer schon sprechen. Daher ist die ‚natürliche‘ Sprache, d.h., die Sprache, die wir jeweils haben und die die Logiker heute manchmal Umgangssprache nennen, die Voraussetzung der weiteren Erkenntnis und damit auch der weiteren Verschärfung der Begriffe. Verschärfung der Begriffe heisst aber: Korrektur der Umgangssprache. Und so ist diese Sprache ein Mittel, das uns immer von neuem Wirklichkeit erschließt und uns an Hand der erkannten Wirklichkeit gestattet, jenes Mittel selbst zu korrigieren. Dieser, wenn man so will, zirkelhafte Vorgang scheint mir derjenige zu sein, der, von der sprachlichen Seite her gesehen, in einer Wissenschaft wie der Physik unablässig geschieht. In dem Augenblick, in dem wir Sprache, die wir immer schon sprechen, nur als bloße Sprachgestalt betrachten oder sagen: Ja, wir können uns eben so ausdrücken, - geht verloren, dass in dieser Sprache schon Wirkliches gefasst ist. Die Sprache, die man spricht, bewegt sich gleichsam immer schon im Medium der Wahrheit. Wäre das nicht so, so wäre keinerlei Wissenschaft möglich. Sie bewegt sich aber nicht so im Medium der Wahrheit, dass sie uns garantierte oder sogenannte absolute Wahrheit gewährte, sondern sie bewegt sich so im Medium der Wahrheit, dass sie uns ermöglicht, tiefer in die Wahrheit einzudringen als zuvor.“ (Weizsäcker, 1982, S. 82f).

Folgt man dieser Sichtweise, so existiert folgendes grundsätzliche didaktische Problem: Es geht aus philosophischer und fachwissenschaftlicher Sicht nicht um den Sprung aus der Alltagswelt in die Andersweltlichkeit der Atome, sondern darum, in einem schrittweisen Prozess die Umgangssprache beim Umgang mit naturwissenschaftlichen Inhalten so zu verschärfen, dass die Lernenden sich nach diesem Prozess in verschiedenen Modellsprachen (z.B. der Umgangssprache, der klassischen Korpuskelp Physik und der Quantenmechanik) verständigen können (wobei diese Modellsprachen nicht voneinander unabhängig sind). Statt vom „Sprung zu den Atomen“ (z.B. Buck, 1994; Buck, Seilnacht, Rehm, 2004) sollte man naturwissenschaftlich zutreffender davon sprechen, *anlässlich* der Beschreibung der atomaren Welt den „Sprung in ein anderes Beschreibungssystem der phy-

sikalischen Welt“ zu vollziehen. Der „Sprung zu den Atomen“ wäre dann eher ein didaktisches als ein fachwissenschaftliches Phänomen, denn bei einer fachwissenschaftlich „richtigen“ Beschreibung der atomaren Welt treten Schülerinnen und Schüler wahrscheinlich zum ersten Mal mit dem mächtigen, anschauungsfremden Beschreibungssystem der Quantenmechanik in Kontakt. Bucks und Rehms Vorwurf, dass die eher herkömmlichen Einführungen in den Atombau „fachlich“ falsch sind, träfe damit auf jede Anwendung der Newtonschen Mechanik in der makroskopischen Erfahrungswelt zu, die nie als „richtig“, sondern nur als Näherungsbeschreibung einer eigentlich besser nach den Gesetzen der Quantenmechanik zu beschreibenden Wirklichkeit begriffen werden muss. Wenn die quantenmechanische Beschreibungsweise eigentlich die naturwissenschaftlich richtigere ist, dann dürften von einem rigiden „fachlich“ naturwissenschaftlichen Standpunkt aus Eigenschaften wie Farbe, Schmelzpunkt, Stoffbegrenzung nicht nur nicht auf die atomare Welt übertragen werden, sie dürften auch für die Beschreibung der makroskopischen Welt gar nicht erst gebraucht werden.

Für Autoren, die das Kugelteilchenmodell wegen seiner fachlichen Unzulänglichkeit kritisieren und einen fachlich geeigneteren Zugang fordern (z.B. Buck 1994; 2004; Buck, Rehm, Seilnacht 2004; Müller, 1994 bzw. Rehm, 2004; Schlöpke 1987), entsteht damit eigentlich das didaktisch schwierige Problem, von vorneherein den Lernenden einen unverstellten Blick auf die fachlich richtige Quantenmechanik zur Beschreibung auch der makroskopischen Wirklichkeit zu eröffnen. Da dieses Vorhaben wegen der mathematischen Unanschaulichkeit äusserst anspruchsvoll erscheint, kann aus der Sicht dieser Arbeit die Verwendung des Teilchenmodells nicht glaubwürdig aus einer naturwissenschaftlich-fachlichen Perspektive kritisiert werden. Nach der Auffassung des Autors käme es eher darauf an, multiple Wirklichkeitsbeschreibungen in einem stufenweisen Prozess zu verfeinern und angemessen neben- und miteinander zu gebrauchen.

2.4.4 Der Zugang zur Teilchenwelt in der Sichtweise dieser Arbeit

Für diese schrittweise Verschärfung der Umgangssprache hin zu einer quantenmechanischen Beschreibung der physikalisch-chemischen Welt gibt es nach Auffassung des Autors verschiedene Lernpfade (z.B. Benutzung des System-Systemkomponentenmodells, schrittweises Verschärfen des Modells der kugelförmigen Korpuskeln oder Betonung des Lernens über den Modellbegriff). Ob einer dieser Pfade besonders einfach verständlich und wirksam im Schulunterricht vermittelt werden kann oder ob sich diese Herangehensweisen eventuell ergänzen, sollte auch in empirischen Studien untersucht werden.

Gegenüber der fachlich begründeten scheint die phänomenologisch orientierte Kritik am Kugelteilchenmodell nachvollziehbarer. In phänomenologischer Sichtweise existiert der Unterschied zwischen makroskopischer und atomarer Welt, dass die atomare Welt im Gegensatz zur makroskopischen Welt nicht sinnlich, aber durchaus denkend erschlossen werden kann. Anschauliche Modelle führen in dieser Sichtweise allzu leicht in die (denkerische) Irre. Falls allerdings bei einem phänomenologisch orientierten Zugang zur atomaren Welt (Buck, 2004) - wenn auch nur versuchsweise - die Lernenden anschauliche makroskopische Modellstrukturen auf die atomare Welt übertragen sollen, dann ist schwierig einzusehen, dass ein solcher alternativer Zugang die Probleme vermeidet, die der Gebrauch anschaulicher Modelle mit sich bringt. Die Verwendung des Kugelteilchenmodells gesteht die Probleme der Bildung „abundanter“ Atommerkmale offen ein und vertraut darauf, unanschauliche Beschreibungen der physikalisch-chemischen Welt im oben von Weizsäcker beschriebenen allmählichen Prozess der Sprach (bzw. Modell)-umbildung besser erfassen zu können. Dass sie in einem zweijährigen naturwissenschaftlichen Unterricht kaum für die Mehrheit der Lernenden klar werden, muss aus dieser Sicht akzeptiert werden.

Zusammenfassend besteht bezüglich der Andersweltlichkeit der quantenmechanischen Beschreibung also die Situation, dass im Falle der Newtonschen Mechanik und der Quantenmechanik zwei Beschreibungssysteme der makroskopischen und der submikroskopischen physikalischen Welt gegeben sind, wobei die Quantenmechanik auf der atomaren wie auf der makroskopischen Ebene die insgesamt gültigere Sprache ist, allerdings für bestimmte Aspekte Teile der Newtonschen Beschreibungsweise auch gebraucht werden können (z.B. für Aspekte des Bohrschen Atommodells). Nach

dieser Sichtweise muss zur Beschreibung und Kommunikation im Schul- aber auch im Wissenschaftskontext das jeweils nützlichste Beschreibungssystem aus einem System multipler externer Repräsentationen ausgesucht werden. Für die Chemie hat eine Untersuchung der Kommunikation in realistischen chemischen Gruppenarbeitssituationen dementsprechend gezeigt, dass Studenten und Wissenschaftler sich im Verlauf solcher Kollaborationssequenzen auf situativ problemadäquate Beschreibungssysteme einigen, die dann aber auch nicht fachlich umfassend gültig sind, sondern im jeweiligen Kontext zielführend (Kozma, 2003).

Diese für die Einführung in die atomare Welt typische und sehr schwierige Situation, dass nämlich kaum ein Gegenstandsbereich gefunden werden kann, dessen strukturelle Eigenschaften als einfach lernbares und trotzdem valides Modell für die atomare Welt gelten kann, legt folgende Vermutungen nahe:

Wenn wir z.B. im Chemieunterricht in einem begrenzten Zeitraum etwas über die atomare Dimension erfahren, übertragen wir in der Regel aus anderen bekannten Bereichen Wissensstrukturen. Das Systembeispiel Erde vs. Atom von Buck scheint diese Vermutung zu belegen, gerade weil es für sich beansprucht, die Übertragung von einem Modellbereich auf einen Gegenstandsbereich durch die Betonung der Systemverschachtelung zu vermeiden, während aber bei genauem Hinsehen kritikwürdig strukturelle System(Modell)-zusammenhänge vom makroskopischen auf den atomaren Bereich übertragen werden, ohne dass im Anfangsunterricht eine Modellbeschreibung mithilfe des adäquaten Welle-Teilchen Dualismus zum Vergleich dagegen gestellt werden kann.

Wenn wir falsche Vorstellungen der atomaren Welt korrigieren wollen, müssen wir den langsamen Weg der allmählichen Schärfung der Modellvorstellungen gehen, bei der sich allmählich unterschiedliche Sichtweisen der makroskopischen und atomaren Welt durch unterschiedliche Modelle bilden, die trotz aller Unterschiedlichkeit immer auch gemeinsame Ursprünge und weitere Ähnlichkeiten aufweisen. Die vielen enttäuschenden empirischen Ergebnisse zu den Vorstellungen der atomaren Welt von Schülerinnen und Schülern würden in dieser Sicht damit erklärt, dass es fast unmöglich erscheint, den makroskopischen Modellvorstellungen in kurzer Zeit eine (fachlich akzeptable) andersweltliche Vorstellung entgegenzustellen. Vielmehr müsste in einem langwierigen Prozess - in dem wahrscheinlich viele in den letzten Jahren ausgearbeiteten alternativen Zugänge ihren Platz finden könnten - allmählich eine adäquate Modellvorstellung der andersweltlichen atomaren Welt aufgebaut werden.

2.5 Grundlegende Positionen für den die psychologisch-pädagogische Methodik dieser Arbeit

2.5.1 Anwendung der erkenntnistheoretischen Position des interpretativen Realismus auf den Gegenstandsbereich des mentalen Teilchenmodells der Stoffe

Die vereinfachte, schematische Abbildung 2.2 versucht zu verdeutlichen, von welcher erkenntnistheoretischen Ausgangsposition im Rahmen eines interpretativen Realismus die Gegenstandsbereiche makroskopische Phänomene, wissenschaftliche Teilchenmodelle der Stoffe und mentale Schülermodelle in dieser Arbeit betrachtet werden:

Die externe Realität wird von der phänomenalen Welt, also der inneren mentalen Welt der Unterrichtenden/Forschenden unterschieden und abgegrenzt. Die phänomenale Welt stellt hier die mentale Welt, die Interpretationskonstrukte der Lehrenden/Forschenden bezüglich des Teilchenmodells, des mentalen Teilchenmodells der Lernenden und ihre eigenen wissenschaftlichen Modelle über diese beiden Bereiche dar. Die Interpretationskonstrukte der phänomenalen Welt umfassen also die gesamte subjektive Wirklichkeit der Lehrenden bezüglich des Teilchenmodells. Demgegenüber steht hier eine angenommene von den Lehrenden unabhängige Realität, über die aber wegen der umfassenden Interpretationsimprägniertheit aller Aussagen keine sicheren Angaben gemacht werden können. Zwischen phänomenaler Welt und Realität werden Relationen (rote Pfei-

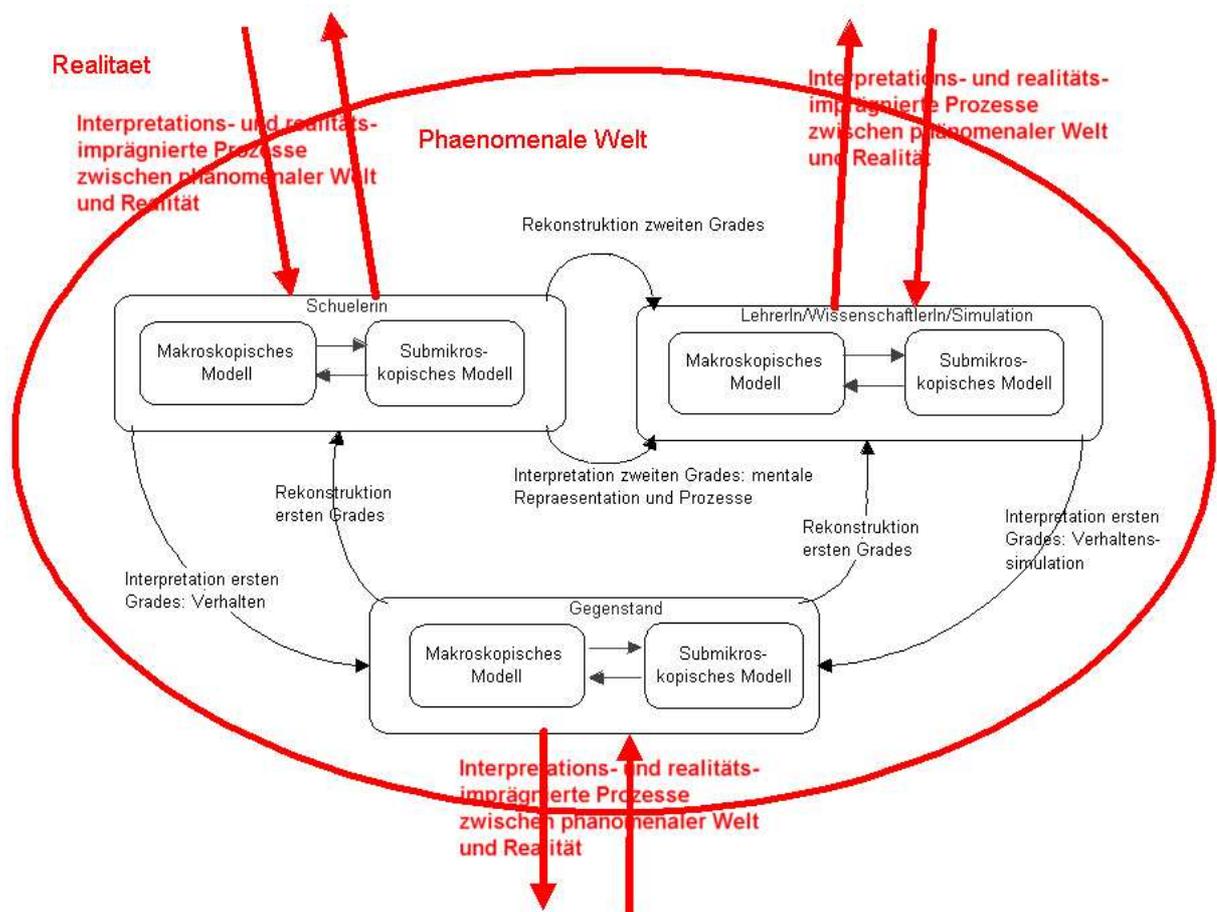


Abbildung 2.2: Verhältnis von externer Realität und interner phänomenaler Welt

le) angenommen. Sie stehen nicht für einfache Abbildungen der Realität auf die mentale Welt (das wäre ein naiver Realismus), sondern lediglich für die Annahme, dass manche Aspekte der Realität zu den zugeordneten Interpretationskonstrukten der mentalen Welt in einem regelhaften Verhältnis stehen. Die Relationen können also die Realität auch unzutreffend abbilden. Allerdings nimmt dieser Ansatz an, dass manche in jahrhundertealter Forschung zu einer gewissen Stabilität gekommenen Bereiche des mentalen Modells (z.B. bezüglich der klassischen Mechanik oder des Teilchenmodells, bezüglich der Existenz eines Gehirns der Forschenden und der Lernenden und bestimmter Eigenschaften des Gehirns) der Realität schon weitgehender entsprechen, als dass sie bloße Erfindungen wären, indem sie die Realität in einigen Aspekten zutreffend beschreiben. Wenn theoretische Annahmen und empirische Beobachtungen (die natürlich alle in der phänomenalen Welt liegen) intersubjektiv übereinstimmend weitgehend zueinander passen, ist es plausibel und vor allem *konsistent* anzunehmen, dass es eine Annäherung zwischen mentalem Modell und einem entsprechenden Bereich der Realität gegeben hat.

Innerhalb der phänomenalen Welt der Lehrenden/Forschenden gibt es einen Gegenstandsbereich (also eine differenzierte Vorstellung darüber, wie die Realität des Teilchenmodells und der betroffenen makroskopischen Phänomene beschaffen ist), es gibt dort Lernende, sowie natürlich auch die wissenschaftlichen Modelle über das mentale Modell von Lernenden, die das pädagogische Handeln leiten. Diese drei für diese Arbeit besonders wichtigen Bereiche stehen wiederum in gegenseitigen Beziehungen: Wenn ein Modell über einen anderen Gegenstandsbereich aufgebaut wird, spricht man von einer Rekonstruktion. Eine Rekonstruktion ersten Grades betrifft dabei die Rekonstruktion eines als objektiv empfundenen Gegenstandsbereichs (wie z.B. das Teilchenmodell oder direkte wissenschaftliche Beobachtungen), eine Rekonstruktion zweiten Grades beschreibt die Rekonstruktion eines mentalen Modells eines anderen Menschen. Eine Interpretation bedeutet umgekehrt, dass ein mentales Modell auf einen Gegenstandsbereich angewandt wird. Z.B. benutzen die Lehrenden ihr mentales Modell der Schülerinnen und Schüler in einer Interpretation zweiten Grades, um ihre Beobachtungen über die Schülerinnen und Schüler wahrzunehmen, zu strukturieren, zu verarbeiten und um letztlich modellgeleitet pädagogisch zu handeln.

In der transzendentalen Variante des interpretatorischen Erkenntnisansatzes sind Interpretationskonstrukte, die in Auseinandersetzung mit der "externen" Realität (rote Doppelpfeile) entstanden, von ihr imprägniert. Mentale Repräsentationen als Interpretationskonstrukte eines Individuums sind hier keine reinen Beobachterartefakte, sondern besitzen einen Bezug zur Realität, wenn dieser auch nicht eindeutig geklärt werden kann. Aus praktischen Gründen und wegen der logischen Konsistenz innerhalb der hier zugrunde gelegten Erkenntnistheorie werden wissenschaftliche Teilchenmodelle, makroskopische Beobachtungen von naturwissenschaftlichen Phänomenen, psychologische und fachdidaktische Modelle etc. als der externen Realität verbundene Interpretationskonstrukte angesehen.

Für die psychologische und didaktische Untersuchung des Teilchenmodellerwerbs nehme ich an, dass Menschen sowohl zu den betroffenen direkten Beobachtungsbereichen (z.B. der Brownschen Bewegung oder der Diffusion) als auch zum wissenschaftlichen Teilchenmodell mentale Repräsentationen mit Realitätsbezug aufbauen, also auch, dass Psychologinnen und Psychologen, Didaktikerinnen und Didaktiker und kognitive Simulationen bedeutungsvolle Aussagen über mentale Prozesse von Lernenden machen können. In dieser Sichtweise bedeuten in der unten folgenden Abbildung 1 die roten Pfeile, die mentale Welt und Realität verbinden, dass die mentale Welt bezüglich der entsprechenden Bereiche der externen Realität eine Bedeutung hat. Aus praktischen Gründen werden im folgenden solche mentalen Repräsentationen als realitätsbeschreibende Grundlage behandelt, wobei immer mitgedacht werden muss, dass sie lediglich realitätsimprägnierte Interpretationskonstrukte sind, deren Realitätsgehalt nie genau bestimmt werden kann.

2.6 Das Verständnis der Kognitionswissenschaften in dieser Arbeit: Die schwache Interpretation der Kognitionswissenschaften

Die Kognitionswissenschaften beschäftigen sich damit, auf der Grundlage repräsentationaler mentaler Strukturen und der auf ihnen wirkenden Operationen eine Erklärung intelligenten Verhaltens zu finden.

Bezüglich des ontologischen Status der Kognitionswissenschaften werden zwei Auffassungen unterschieden (z.B. Opwis & Spada, 1994; Wallach, 1998). Die starke Auffassung der Kognitionswissenschaften (z.B. Pylyshyn, 1986) vertritt die These, dass Individuen tatsächlich die von ihr mentalen Strukturen besitzen und in den Individuen tatsächlich Operationen ablaufen, die auf einer bestimmten, der kognitiven, Abstraktionsstufe identisch mit den Prozessen sind, die auf einem Rechner intelligentes mentales Verhalten produzieren. Modelltheoretisch ausgedrückt, ist in dieser Sichtweise eine valide Computersimulation menschlicher Informationsverarbeitung ein wortwörtliches Modell, das Objekte und die Relationen zwischen ihnen abbildet.

Im Gegensatz dazu versteht die schwache These der Kognitionswissenschaften ihre Arbeitsmittel der mentalen Repräsentationen und der kognitiven Simulationen nicht als wortwörtliche Abbildungen, sondern lediglich als Hilfsmodelle, um kognitive Aktivitäten aufklären zu können. Das bedeutet, dass ein kognitives Modell lediglich als Hilfsmittel aufgefasst wird, um die kognitiven Aspekte menschlichen Verhaltens interpretierend rekonstruieren zu können.

Die schwache These der Kognitionswissenschaften ist aufgrund dieses interpretativen Ansatzes mit der wissenschaftstheoretischen Grundposition des interpretativen Realismus vereinbar und wird in dieser Arbeit vertreten.

Kapitel 3

Überblick über den einschlägigen Forschungsstand

Dieses Kapitel

- präsentiert den naturwissenschaftlichen Lehrinhalt, das klassische Teilchenmodell der kinetischen Gastheorie, den diese Dissertation in den Mittelpunkt der Untersuchung rückt. Im Laufe dieses Kapitels werden daher auch die für die Untersuchung benutzten chemisch-physikalischen Phänomene auf der fachwissenschaftlichen Ebene vorgestellt. Bei diesen Phänomenen handelt es sich um die Diffusion von Gasen durch Ton, um die Brownsche Bewegung und um die thermische Expansion von Luft, die von Schülerinnen und Schülern mit einem Teilchenmodell erklärt werden sollen.
- zeigt die wichtigen Ergebnisse der empirischen didaktischen Forschung zu den verbreiteten Alltagsmodellen über Stoffmodelle.
- berichtet über didaktische Vorschläge, die in diesem Zusammenhang zur pädagogischen Intervention gemacht wurden.
- behandelt das für den Teilchenmodellerwerb relevante Lernmodell der Kognitionswissenschaften, nämlich das Lernen mit Analogien. Wichtige Aspekte des Modellbegriffs können sowohl bei der Analyse des Lerngegenstands als auch des Lernens mit Analogien angewendet werden. Der Modellbegriff wird dabei auf die Beziehung zwischen der makroskopischen Stoffebene und der submikroskopischen Teilchenebene angewendet, auf die Beziehung zwischen dem Sachmodell und seiner mentalen Repräsentation und auf die Beziehung zwischen den mentalen Repräsentationen bei Lernenden und Lehrenden. Der Schluss dieses Abschnitts stellt einige relevante Ergebnisse der kognitiven Entwicklungspsychologie vor.
- zieht aus diesem psychologischen und didaktischen Forschungsstand Schlussfolgerungen für die Ausrichtung dieser Arbeit.

3.1 Begründung der gewählten Darstellung der fachwissenschaftlichen Zusammenhänge

Im folgenden wird zunächst das allen Phänomenerklärungen zugrundeliegende Modell der makroskopischen realen Gase sowie seiner submikroskopischen Modellierung vorgestellt. Danach folgen die Erklärungen der ausgewählten makroskopischen Phänomene („Gasdiffusion“, Brownsche Bewegung, thermische Luftexpansion) durch das submikroskopische Teilchenmodell des realen Gases. Die fachwissenschaftliche Darstellung folgt für jedes Phänomen in zwei Schritten:

1. Für jedes Phänomen wird im ersten Schritt eine makroskopische quantitative Darstellung vorgestellt, mit der das Phänomen makroskopisch ausreichend genau dargestellt und gegebenenfalls berechnet werden kann. Diese makroskopische Beschreibung kann zwar zur Erklärung auf der makroskopischen Ebene benutzt werden (weil die abhängige makroskopische Variable ohne Gebrauch der Teilchenebene auf die unabhängige makroskopische zurückgeführt wird), dient hier aber nur zur genauen Erfassung der makroskopischen Beobachtung und soll erst durch das submikroskopische Teilchenmodell des realen Gases erklärt werden, also auf es zurückgeführt werden. Die makroskopische quantitative Berechnung kann deshalb später nützlich werden, weil sie ein genaues makroskopisches Kriterium für das entsprechende Verhalten der dynamischen Teilchensimulation liefern kann, das die Lernenden zur Erklärung des jeweiligen Phänomens mit der computergestützten Konstruktionsumgebung erstellen sollen (wobei diese Ausbaustufe der Konstruktionsumgebung noch nicht erreicht ist).
2. Im zweiten Schritt wird dann die submikroskopische Teilchenerklärung des jeweiligen Phänomens vorgestellt. Sie enthält auf Modellseite diejenigen Variablen, die den entscheidenden Variablen des makroskopischen Stoffverhaltens entsprechen. Die abhängige makroskopische Variable soll auf Einflussgrößen des submikroskopischen Gasmodells quantitativ zurückgeführt, also in diesen mechanischen Sinne erklärt werden.

Mit diesen zwei Schritten wird also sichergestellt, dass zunächst die entscheidende makroskopische zu erklärende Variable des Phänomens in Abhängigkeit von den jeweiligen makroskopischen Einflussgrößen berechnet werden kann. Der Wert dieser Variablen wird danach auf der Modellseite erklärt, indem auf Modellseite die der unabhängigen makroskopische Variable entsprechende Variable auf die jeweils gültigen Einflussvariablen des submikroskopischen Gasmodells zurückgeführt wird. Damit ist klargestellt, welche Eigenschaften ein von den Schülerinnen und Schülern zur Erklärung der makroskopischen Variablen konstruiertes Teilchenmodell haben muss. In einem späteren Ausbauschnitt kann dann das konstruierte Teilchenmodell von der Software mit dem Verhalten des Phänomens verglichen werden.

3.2 Das für die ausgewählten Phänomene geeignete fachwissenschaftliche Modell des Gasverhaltens: das van-der-Waals-Modell der realen Gase

Im folgenden wird auf die fachdidaktisch-lernpsychologische Diskussion vorgegriffen, um auch aus den später wichtig werdenden fachdidaktisch-lernpsychologischen Gründen eine Entscheidung für eine der verschiedenen Formulierungen der kinetischen Gastheorie treffen zu können. Denn ein geeignetes fachwissenschaftliches Rahmenmodell der Gase sollte nach Möglichkeit beide Gruppen von Bedingungen erfüllen, lernpsychologisch-didaktische und fachwissenschaftliche:

- Die Modellerklärungen sollten aus fachdidaktisch-lernpsychologischer Sicht so beschaffen sein, dass sie in qualitativer Form von Anfängerinnen und Anfängern in ihr naives Vorwissen integriert werden können. Das ist bei der kinetischen Gastheorie nach van der Waals gegeben.
- Das Gasmodell muss aus fachwissenschaftlicher Perspektive mächtig genug sein, um alle relevanten makroskopischen Phänomene erfassen zu können. Auch das ist bei der kinetischen Gastheorie nach van der Waals gegeben.

Das Modell der *idealen Gase* ist für den ersten Punkt zwar aufgrund seiner Einfachheit sehr gut geeignet, verursacht aber beim zweiten Punkt Schwierigkeiten: Es ist nicht erklärungs mächtig genug, weil ein diskretes Modell der Gase ohne Feldwechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen (im Modell der idealen Gase gibt es lediglich Kollisionen zwischen punktförmigen Teilchen) z.B.

nicht in der Lage ist, den Übergang von dem einem Aggregatzustand des Gases in einen anderen (fest oder flüssig) zu deuten. Hingegen genügt das van-der-Waals-Modell der realen Gase beiden Bedingungen: Es ist immer noch relativ einfach und berücksichtigt von vorn herein die entscheidenden Feldwechselwirkungskräfte zwischen den ausgedehnten Teilchen. Fachwissenschaftlich ist das reale Gasmodell damit mächtig genug, auf einfache Art z.B. Änderungen des Aggregatzustands zu erklären und darüber hinaus schon einen Ansatz für eine erste Teilchenerklärung chemischer Änderungen zu bieten (Rohr, 1993). Vom lernpsychologisch-fachdidaktischen Standpunkt aus ist das Modell von van der Waals geeignet, weil es auch von Anfängerinnen und Anfängern mit ihrem Vorwissen verbunden werden. Sie kennen aus ihrer Erfahrungswelt meist schon magnetische Phänomene und können somit einfache Feldwechselwirkungskräfte auf ihr erstes Teilchenmodell übertragen. Über das Modell von van der Waals hinausgehende Modellerklärungen (z.B. quantenmechanische) sind dagegen für diese Schülerinnen und Schüler nicht mehr nachvollziehbar. Im Folgenden wird deshalb das Modell der realen Gase aus fachwissenschaftlicher Perspektive vorgestellt.

Da die fachwissenschaftliche Betrachtung der Lerninhalte einen Hintergrund für die Aktivitäten bei ihrem Erwerb bildet und gleichzeitig aber die Auswahl der geeigneten Phänomene auch von fachdidaktischen, bzw. lernpsychologischen Überlegungen abhängt, müssen wie oben erwähnt die drei Phänomengruppen, die in den theoretischen und empirischen Untersuchungen dieser Arbeit hauptsächlich verwendet werden, hier im Vorgriff auf die fachdidaktisch-lernpsychologischen Überlegungen vorgestellt werden. Es handelt sich um die Diffusion von Gasen durch Ton, um die Brownsche Bewegung und um die thermische Luftexpansion. Diese Phänomene scheinen einerseits zum Einstieg in das Teilchenmodell geeignet, lassen andererseits aber auch schon wesentliche Probleme des Teilchenmodellerwerbs deutlich werden.

3.2.1 Die fachwissenschaftlichen Zusammenhänge des van-der-Waals-Modells.

Bevor die fachwissenschaftlichen Grundlagen der ausgewählten Phänomene vorgestellt werden, soll kurz die ausgewählte Interpretationsrichtung und -darstellung begründet werden: Diese Arbeit fokussiert auf fachwissenschaftlicher Seite eine erklärende Verbindung der beiden - prinzipiell zu trennenden - Ebenen der makroskopischen Erfahrung und der hypothetischen Modellwelt der Teilchen. Dies wiederum bedeutet, dass hier einerseits makroskopische Darstellungen der ausgewählten Phänomene und andererseits ihre (für den Anfangsunterricht) möglichst einfachen submikroskopischen Erklärungen von Interesse sind. Auf der makroskopischen Ebene verbleibende Erklärungen sind für die Themenstellung nur nebensächlich. Dies heißt z.B. für die Brownsche Bewegung, dass die relativ einfache submikroskopische Erklärung zunächst ausreicht, wie sie z.B. Ackermann (1992) darstellt. Alternative makroskopische Erklärungen der permanenten Bewegung unter dem Lichtmikroskop sichtbarer Teilchen, die die begrenzte Gültigkeit des makroskopisch hergeleiteten zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik anzeigen (Dahlmann, 1997), machen aus der Sicht dieser Arbeit korrekterweise deutlich, dass die atomare Modellebene zur Erklärung nicht zwingend notwendig ist (was im hier dargestellten Verständnis aus der Unterdeterminiertheit der Modellerklärungen der makroskopischer stofflicher Phänomene folgt).

3.2.1.1 Eine erste (und didaktisch nachteilige) makroskopische Beschreibung realer Gase: der Virialansatz

Behandelt man Luft wie ein ideales Gas, ergibt sich für den Zusammenhang von Druck, Volumen, Molzahl und Temperatur folgende Zustandsgleichung:

$$pV = nRT$$

p: Gasdruck in bar;

V: Gasvolumen in dm³;

n: Anzahl der Mole in mol

R: Universelle Gaskonstante mit $0.08205 \text{ dm}^3 \text{ atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

T: Temperatur in K

Das makroskopische Volumen eines Gases ist also für ein ideales Gas bei konstanter Masse und konstantem Druck proportional der Temperatur. Schon bei Normaldruck und Zimmertemperatur gilt für viele Stoffe der Ausdruck für den Kompressionskoeffizienten (für 1 Mol)

$$\frac{pV}{RT} = 1$$

nicht mehr genau. Unter folgenden Bedingungen ergeben sich zum Beispiel mehr oder weniger erhebliche Abweichungen:

- bei hohen Drücken
- Bei niedrigen Temperaturen
- Bei Stoffen, die schon unter Alltagsbedingungen nicht mehr gasförmig sind.

Mit einem allgemeinen, nicht auf spezifischen physikalischen Vorannahmen beruhenden Verfahren, dem Virialverfahren, können diese Abweichungen relativ gut rechnerisch bewältigt werden. Z.B. lässt sich der Kompressionskoeffizient durch eine Potenzreihe, die Virialentwicklung der Gasdichte, an die gemessenen Verhältnisse angepasst werden (hier für 1 Mol):

$$\frac{pV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots$$

Forscher wie Berthelot, Dieterici-Gleichung, Beattie-Bridgeman oder Kammerlingh Onnes haben noch andere Zustandsgleichungen für reale Gase vorgeschlagen (Atkins, 1990, S.37), die meist bestimmten Annahmen für den zweiten und dritten Virialkoeffizienten entsprechen. Sie haben sich alle in der Praxis nicht durchgesetzt.

Der Virialansatz hat für didaktische Zwecke den entscheidenden Nachteil der theorieleeren Anpassung an die empirischen Messergebnisse; die Abweichungen werden nicht eigentlich erklärt (also auf grundlegendere Gesetzmäßigkeiten zurückgeführt), sondern nur mathematisch beschrieben. Von Schülerinnen und Schülern einsehbare Anschauungen zu den einzelnen Virialkoeffizienten sind damit von vornherein nicht intendiert. Van der Waals ist einen anderen Weg gegangen, indem er die im nächsten Abschnitt näher beschriebenen einfachen submikroskopischen Annahmen zugrunde legte. Diese Annahmen haben konkrete physikalische Vorstellungen als Hintergrund und eignen sich daher besser für physikalische Interpretationen. Diese Anschaulichkeit kombiniert mit einer für die Zwecke dieser Arbeit ausreichenden Erklärungsmächtigkeit macht ihren didaktischen Vorteil aus.

3.2.1.2 Eine auf einem Teilchenmodell beruhende Korrektur des idealen Gases: die van-der-Waals-Gleichung und ihre vereinfachte Form, der Grundlage des Teilchenmodells dieser Arbeit

Dem allgemeinen Gasgesetz entspricht das Modell des idealen Gases in der kinetischen Gastheorie. Seine grundlegenden Annahmen (s. z.B. Wedler, 1987) lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das Gas besteht aus einzelnen Teilchen.
- Die Gasteilchen sind punktförmig (d.h., sie besitzen keine endliche Ausdehnung).
- Die Gasteilchen befinden sich in ständiger Bewegung.
- Gasteilchen bewegen sich ohne Krafteinwirkung gleichförmig in derselben Richtung weiter.
- Die Gasteilchen üben außer bei der Kollision keine Kräfte aufeinander aus.
- Für Stöße der Gasteilchen untereinander und mit dem Gefäß gelten der Energie- und Impulserhaltungssatz uneingeschränkt.

- Veränderungen der Gasteilchenbewegung werden durch Krafteinwirkung verursacht. Es werden zunächst folgende Fälle unterschieden:

- Beim Wirken von Schwerkraft:
 - Die Teilchen werden mit einer konstanten Kraft nach unten gezogen (d.h., die Teilchen werden pro Zeiteinheit mit einem einheitlichen Betrag nach unten beschleunigt):
 $F_g = m_{\text{Teilchen}} g$.
 - g: Erdbeschleunigung mit $9.81 \frac{m}{s^2}$
- Bei Kollision mit einer Wand/einem Hindernis: Die Geschwindigkeitskomponente des Teilchens, die senkrecht zur Wand/zum Hindernis zeigt, zeigt nach der Kollision in die umgekehrte Richtung, d.h. ihr Vorzeichen wird umgekehrt:
 - $v'_x = -v_x$, wobei v_x die Komponente des Geschwindigkeitsvektors ist, die senkrecht zur Wand zeigt.
- Bei der Kollision von zwei Teilchen (zur Veranschaulichung werden hier verschiedene endliche Umfänge angenommen). Für die Geschwindigkeitsvektoren der beiden Teilchen nach einer Kollision gelten folgende Gleichungen, die entsprechend in der weiter unten vorgestellten Simulation des Teilchenmodells verwendet werden:

$$v'_2 = v_2 + 2 * \frac{m_2}{m_1+m_2} * \cos a * \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} (v_2 - v_1)$$

$$v'_1 = v_1 + 2 * \frac{m_2}{m_1+m_2} * \cos a * \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} (v_2 - v_1)$$

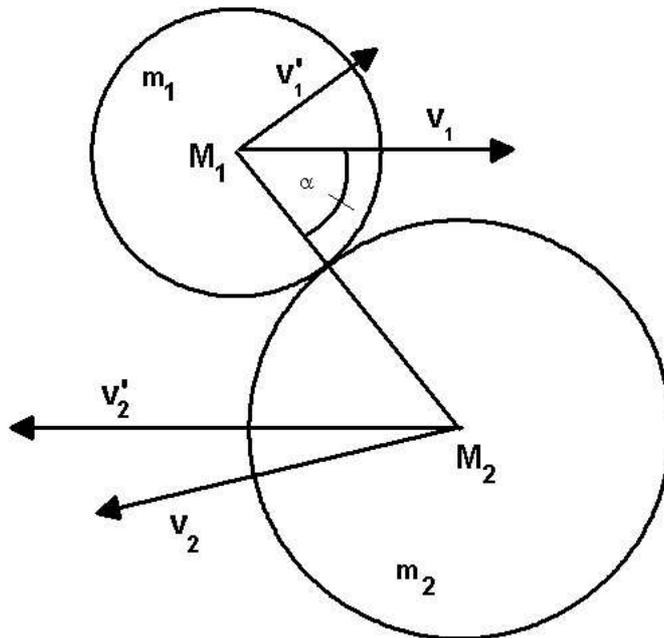


Abbildung 3.1: Zentrale Kollision zweier Scheiben

Aufgrund submikroskopischer Überlegungen entwickelte van-der-Waals folgende Korrektur des idealen Gasgesetzes zur Anpassung an die p-, V- und T-Messwerte: Er nahm als vereinfachte abstoßende Wechselwirkung zwischen den Molekülen eine im Moment der Kollision harter Kugeln wirkende Abstoßung an, die der elastischen zentralen Kollision der klassischen Mechanik entspricht. Das für den Geltungsbereich des Gasgesetzes verfügbare Volumen muss deshalb um $n \cdot b$ verkleinert werden, b entspricht dem angenommenen molaren Volumen der kugelförmigen Teilchen. Der

Druck eines Gases gegen die Außenwände muss um einen Term verringert werden, der sich quadratisch mit der Dichte erhöht (weil sich die Zahl der momentan an eine Wand stoßenden Teilchen proportional zur Dichte verhält und eine rückziehende Kraft ebenfalls proportional der Dichte auf diese Teilchen wirkt):

$$(p + a(\frac{n^2}{V^2}))(V - nb) = nRT$$

Dabei nimmt man für die Wechselwirkungen der kleinsten Teilchen meist das van-der-Waals-Potential an: Bei der Berührung zweier Teilchen nimmt dies einen unendlich großen Wert der potenziellen Energie an (dies entspricht dem Modell harter Kugeln und steht damit in Beziehung zur Größe b in der van-der-Waals-Gleichung), während es bei größeren Abständen mit $1/\text{Abstand}$ fällt (dies entspricht der gegenseitigen Teilchenanziehung und bezieht sich auf die Größe a der Gleichung. S.a. Bergmann & Schäfer, 1998, S.1107).

Die Größe b der van-der-Waals-Gleichung hat in allen Lernaufgaben eine Bedeutung, da überall mit massiven Teilchenkörpern argumentiert wird. Die Größe a ist nur in den Zusammenhängen wichtig, wo die Natur von Feststoffen erklärt werden muss. Wo es nur um das Gasverhalten geht, können deshalb die quantitativen Zusammenhänge entweder durch das allgemeine Gasgesetz, beziehungsweise durch die vereinfachte van-der-Waals Gleichung ohne Attraktionskräfte ersetzt werden:

$$P(V-nb)=nRT$$

Abbildung 3.2 zeigt einige Isothermen der Druck-Volumen-Beziehung für Sauerstoff als ideales und als reales Gas im Bereich alltäglichen Luftdrucks. Die Kurven für Sauerstoff als ideales und als reales Gas liegen darin sehr nah beieinander (dabei ist die Gaskonstante für ideales und reales Gas als gleich angenommen). Deutliche Unterschiede zwischen der Behandlung als reales und als ideales Gas werden erst im Bereich hoher Drücke und niedriger Temperaturen deutlich.

In Abbildung 3.3 zeigt der nichtmonotone Bereich der realen Gasfunktion etwa den Bereich an, in dem Gas und Flüssigkeit nebeneinander vorliegen (dort beschreibt die Gleichung im Bereich der so genannten van-der-Waals-Schleifen die Zusammenhänge nicht korrekt (wegen der begrenzten Auflösungs-fähigkeit des verwendeten Zeichenprogramms zeigt die Abbildung die nichtmonotonen Bereiche nur angenähert genau an). Nach dem (hier nicht angezeigten) Maxwell-Verfahren werden dort die nicht-monotonen Bereiche durch Waagerechten ersetzt, auf denen Gas und Flüssigkeit nebeneinander vorliegen.

Zur Erklärung der ausgewählten Phänomene dieser Arbeit ist das an-der-Waals-Modell mit seinen Annahmen von massiven Teilchen und Attraktionskräften zwischen den Teilchen mächtig genug:

- Bei der Diffusion von Gasen durch eine Tonwand und der Brownschen Bewegung spielt in den verwendeten Erklärung die Größe der massiven Teilchen (die im idealen Gasgesetz auf einen geometrischen Punkt reduziert ist) die entscheidende Rolle.
- Bei der thermischen Gasexpansion spielt zusätzlich der Feststoff des Kolbens eines Kolbenprobers mit seinem Partikelverband fester Fernordnung eine wichtige Rolle wegen seine Wechselwirkung mit den Gasteilchen. Eine konsequente Teilchenerklärung des Feststoffs muss aber auf eine einfache Form von Attraktionskräften zwischen den Teilchen zurückgreifen (die im idealen Gasmodell ausgeschlossen sind). Sowohl die endliche Größe der kleinsten Teilchen als auch die Attraktionskräfte zwischen den Teilchen sind im idealen Gasmodell nicht, im van-der-Waals-Modell aber sehr wohl enthalten.

Zusammenfassend sind bei der Untersuchung und molekularen Interpretation der Gasgesetze die Abweichungen der idealen von der realen Zustandsgleichung bei Alltagsdrücken und -temperaturen klein. Damit wird die komplette reale Gasgleichung nur bei quantitativen Problemen mit hoher Messgenauigkeit unter extremen Druck- bzw. Temperaturbedingungen wichtig. Ihre molekulare Interpretation wird bei der Einführung in das Teilchenmodell dementsprechend nur dann unverzichtbar, wenn die Feststoffe einer Versuchsapparatur zur Darstellung eines Gasphänomens molekular erklärt werden sollen: Hier müssen Attraktionskräfte zwischen den Teilchen der Feststoffe und damit das der van-der-Waals-Gleichung zugrunde liegende Teilchenmodell angenommen werden. Für den Einstieg in das Teilchenmodell der Gase können Anfängerinnen und Anfänger

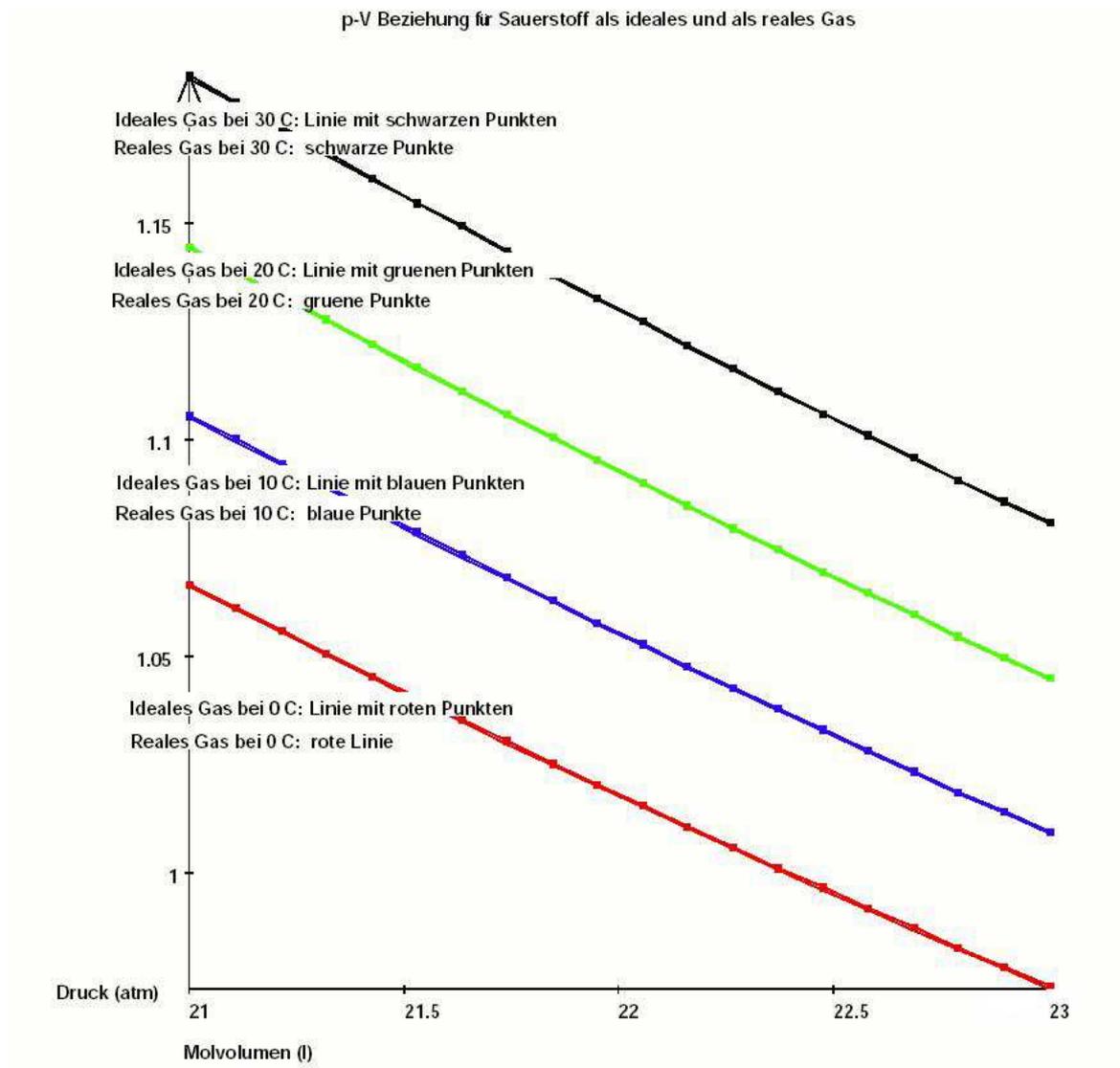


Abbildung 3.2: p-V Beziehung für Sauerstoff als ideales und als reales Gas im Bereich von Alltags-temperaturen

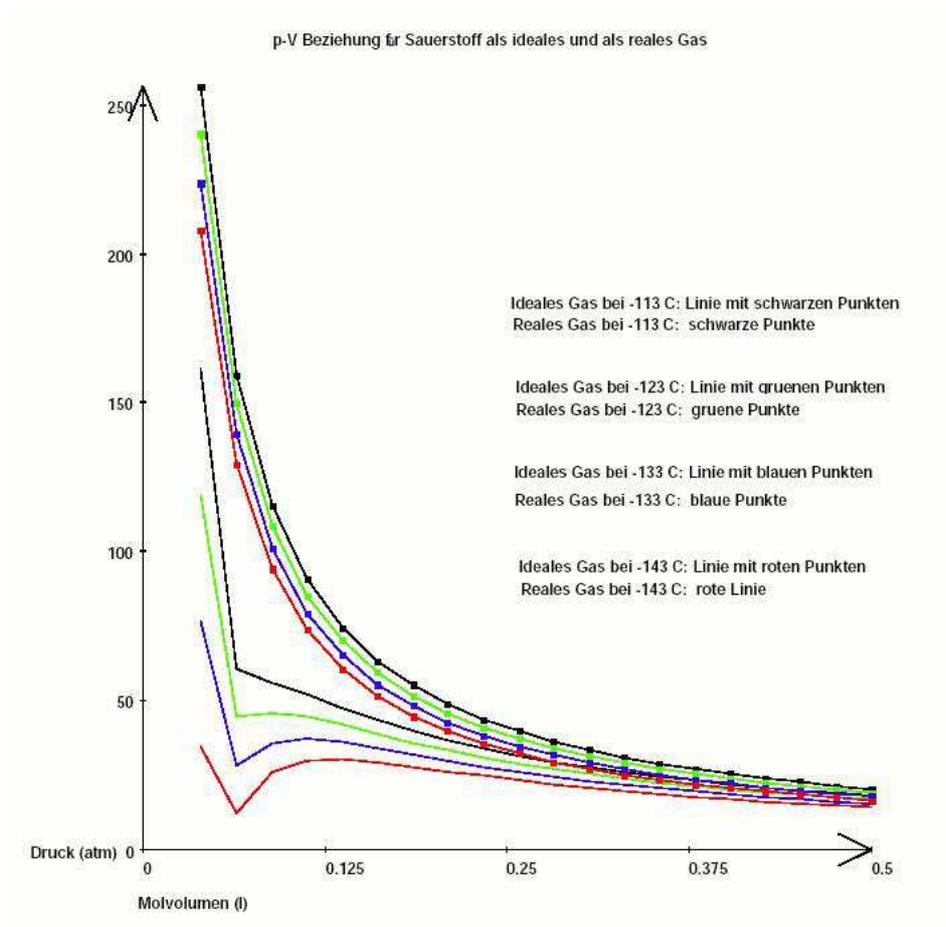


Abbildung 3.3: p-V Beziehung für Sauerstoff als ideales und als reales Gas bei tiefen Temperaturen

in den meisten Fällen mit einer vereinfachten Teilcheninterpretation der van-der-Waals-Gleichung argumentieren, in der ein kleines Volumen der Teilchen, aber keine Attraktionskräfte angenommen werden. Eine Teilcheninterpretation der van-der-Waals-Gleichung, bei der das Teilchenvolumen berücksichtigt, die Attraktionskräfte aber zunächst vernachlässigt werden, kann damit als das erste Teilchenmodell des Anfängerunterrichts angenommen werden. Die Attraktionskräfte zwischen den Teilchen, die im Attraktionsterm der van-der-Waals-Gleichung ausgedrückt werden, spielen im Ansatz dieser Arbeit erst dann eine Rolle, wenn der Aggregatzustand von Flüssigkeiten und Festkörpern durch das Teilchenmodell interpretiert werden soll. Diese Anziehungskräfte brauchen im Anfangsunterricht nur dann mit einbezogen werden, wenn die Lernenden diese Interpretationsprobleme selbst aufwerfen. Beim ersten Lernproblem des Einstiegs in das Teilchenmodell, der Gasdiffusion durch einen Tonzylinder, spielen entsprechend dem Teilchengrößenterm der van-der-Waals-Gleichung die unterschiedlichen endlichen Teilchengrößen der verwendeten Gase die entscheidende Rolle bei der Phänomenerklärung. Attraktionskräfte sind nur zur Modellerklärung des Aggregatzustands der Versuchsanordnung relevant, ein Problem, dass die meisten Anfängerinnen und Anfänger aber intuitiv zunächst aus ihrer Betrachtung ausklammern. Bei der Brownschen Bewegung stellt sich eine ähnliche Situation: Eine endliche Größe der Teilchen muss für die Teilchenkollisionen angenommen werden. Die Attraktionskräfte spielen auch hier nur eine Rolle, wenn der Aggregatzustand der beobachtbaren mikroskopischen Rauchteilchen erklärt werden soll. Bei der thermischen Luftexpansion stellt sich das Erklärungsproblem ähnlich, weil die Attraktionskräfte nur dann gebraucht werden, wenn es um die Erklärung der Versuchsanordnung geht.

3.2.2 Lernpsychologisch-didaktische Eignung des van-der-Waals Modells

Von der lernpsychologisch-didaktischen Seite gesehen sollte das gewählte Modell der Gase so beschaffen sein, dass es möglichst einfach an das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler anknüpft, wenn sie die Unterrichtseinheit über das Teilchenmodell besuchen.

Das van-der-Waals-Modell erfüllt diese Forderung, denn das endliche Volumen der Gasteilchen korrespondiert mit dem endlichen Volumen von makroskopischen Partikeln, auf deren Kenntnis eine Schülerin beim ersten mentalen Aufbau eines Teilchenmodells der Stoffe zurückgreifen kann. Denn aus ihr bekannten makroskopischen Teilchensystemen kann sie ein - noch teilweise "falsches" - initiales mentales Anfangsmodell per Analogieschluss gewinnen. Später kann dieses "falsche" Modell korrigiert werden, z.B. wenn klar wird, dass die makroskopische Temperatur eines Körpers der submikroskopischen Translationsenergie der durchschnittlichen kinetischen Translationsenergie seiner kleinsten Teilchen entspricht.

Darüberhinaus kann ein Schüler beim Kennenlernen der Feldkräfte der Teilchenanziehung im van-der-Waals-Modell auf die ihm meist schon bekannten magnetische Feldkräfte zurückgreifen und damit ein erstes Modell der Anziehungen zwischen den Gasteilchen konstruieren (das natürlich relativ schnell verändert werden muss).

3.2.3 Fachwissenschaftliche Analyse der für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit verwendeten Phänomene

3.2.3.1 *Fachwissenschaftliche Grundlagen der ersten Aufgabe: die „Diffusion“ verschiedener Gase durch Ton*

Die hier vorgestellte Erklärung der „Gasdiffusion“ durch Ton vereinfacht aus lernpsychologischen Gründen die submikroskopische Erklärung: Sie wird als „Diffusion“ durch eine Membran lediglich in eine Richtung behandelt. So kann sie die „Diffusion“ von Wasserstoff, die durch Ton für einige Sekunden beobachtet werden kann, mit der im Vergleich zu Sauerstoff- oder Stickstoffteilchen kleinen Größe der Wasserstoffteilchen erklären, die von diesen drei Teilchensorten als einzige durch die Poren des Tons passen sollen. Lernpsychologisch wird sich später diese Erklärung als besonders nützlich zeigen (empirisch ist das in den Untersuchungen dieser Arbeit nachweisbar), weil sie auf

submikroskopischer Ebene auf einem Größenvergleich der drei Teilchensorten und der Öffnungen im Tonteilchengitter beruht. Dieser aus dem Alltag vertraute Größenvergleich kann einfach auf ein vorgestelltes Teilchenmodell übertragen werden und ist deshalb für Anfängerinnen und Anfänger in einer ersten Teilchenerklärung eines Phänomens ohne auffällige Brüche zwischen makroskopischer und submikroskopischer Welt einfach nachzuvollziehen.

Aus fachlicher Sicht ist diese Lösung jedoch nicht korrekt: Es diffundieren nämlich alle drei Gase durch Ton, außerdem lässt sich die Diffusion von Wasserstoff in eine Richtung lediglich kurze Zeit beobachten (Bukatsch & Glöckner, 1977, S.240). Erklärt wird dies kinetisch: Die hohe Diffusionsgeschwindigkeit von Wasserstoff führt zunächst zur starken Diffusion in eine Richtung mit einer entsprechend zunehmenden Wasserstoffkonzentration auf der Zielseite, bevor dann nach ein paar Sekunden aufgrund der sich ausgleichenden Wasserstoffkonzentrationen auf beiden Seiten der Tonwand ein Diffusionsgleichgewicht eingestellt ist.

Diese kinetische Interpretation der Gasdiffusion ist jedoch deutlich komplexer als die hier für Lernzwecke bevorzugte erste - fachlich jedoch nicht korrekte - Interpretation und deshalb im Anfangsunterricht nicht verwendbar. Weil in dieser Arbeit die Auffassung vertreten wird, dass die ständige Modellmodifikation (also auch die Modifikation fachlich nicht korrekter Erklärungen) aus didaktischen, vor allem aber aus lernpsychologischen Gründen ein unverzichtbares und besonderes Merkmal des Chemieunterrichts ist, wird hier die besondere lernpsychologische Eignung der ersten Interpretation stärker bewertet als die fachlichen Mängel dieser Erklärung. Für diese Vorgehensweise spricht zudem, dass im gängigen Chemieunterricht aus ähnlichen Gründen im Lauf der Zeit vereinfachte, teilweise fachlich schlicht "falsche" ("didaktisch reduzierte") Modelle durch angepasste ersetzt werden. Die oben vorgestellte erste Interpretation wird deshalb in den weiteren Teilen dieser Arbeit benutzt, allerdings werden die Bezeichnungen der auf diese Weise interpretierten Diffusionsphänomene mit Anführungszeichen gekennzeichnet.

Makroskopische quantitative Deskription

Der Versuchsaufbau:

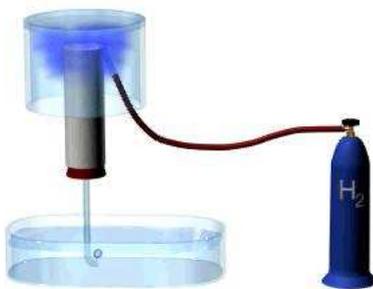


Abbildung 3.4: Versuchsaufbau der Diffusion von Gasen durch einen Tonzyylinder

Unter den Glaszylinder wird entweder Wasserstoff, Helium, Stickstoff oder Sauerstoff geleitet. Wasserstoff und Helium "diffundieren" durch den Tonzyylinder und verursachen einen erhöhten Gasdruck im Tonzyylinder. Sobald alle Luft aus dem Tonzyylinder nach unten ausgetreten ist, herrscht auch innen eine reine Wasserstoffatmosphäre und ein "Diffusionsgleichgewicht" zwischen dem Inneren und dem Äußeren des Tonzyinders.

Erstes und zweites Ficksches Gesetz als quantitative Beschreibung der Diffusion:

Die Diffusion von Gasen, ein Transportvorgang von Materie, wird für einen konstanten Konzentrationsgradienten durch das erste Ficksche Gesetz beschrieben. Die Diffusion eines Gases i in einem Medium j wird darin bestimmt durch den Konzentrationsgradienten des Gases i und seine spezifische Diffusionskonstante im Medium j :

$$\frac{dn}{dt} = -AD_{ij} \frac{dc}{dx}$$

A: Fläche, durch die der Stoff 1 diffundiert.

D_{ij} : Diffusionskonstante des Gases i im Medium j.

$\frac{dc}{dx}$: Konzentrationsgradient des Gases in x-Richtung

Den realistischeren Fall, die Diffusion des Gases bei zeitlich und örtlich unterschiedlichen Dichtegradienten, erfasst das zweite Ficksche Gesetz:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_x = D_{ij} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right)_t$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung zweiter Ordnung hängt von der Wahl der Randbedingungen ab. Eine relativ allgemeine Lösung ist in Ackermann (1992, 129f) beschrieben. Dafür wird eine Anfangsverteilung des diffundierenden Stoffes auf der x-Achse angenommen, wobei die Konzentration an einem x-Wert von

ξ als $f(\xi)$ bezeichnet wird. Es ergibt sich folgende Differentialgleichung für die in einem Abschnitt $f(\xi)$ hervorgerufene Konzentrationsänderung:

$$dc(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}} f(\xi) d\xi$$

Die Überlagerung der Wirkung aller Abschnitte ergibt sich zu:

$$c(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}} f(\xi) d\xi$$

Für den Fall, dass an der Stelle $x = 0$ in der Mitte des Gefäßes eine Trennwand angebracht ist, unterhalb derer der diffundierende Stoff konzentriert ist, der nach dem Wegziehen der Trennwand zum Zeitpunkt $t=0$ in den oberen Teil des Gefäßes diffundiert, ergibt sich folgende Lösung (Ackermann, 1992, S.130f):

$$c(x,t) = \frac{c_0}{2} (1 - \phi(u))$$

Dabei ist:

$$\phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta \quad (\text{Fehlerintegral})$$

und

$$\beta = \frac{\xi - x}{\sqrt{4Dt}}$$

Das Fehlerintegral wird numerisch bestimmt, sodass für verschiedene Zeiten Konzentrationsverteilungen über x ermittelt werden können. Mithilfe dieser Formel lassen sich Konzentrationswerte in Abhängigkeit von Zeit und Ort bestimmen, wenn ein Gas in ein anderes diffundiert.

Diffusion durch eine Membran

Die Diffusion eines Gases durch einen Tonzylinder lässt sich zum einen als stationäres Diffusionsproblem auffassen, wenn man annimmt, dass unter dem Glaszylinder nach Verdrängung aller Luft eine reine Gasatmosphäre herrscht und innerhalb des Tonzylinders nach einer gewissen Zeit sich ebenfalls eine konstante Konzentrationsverteilung einstellt. Dann gilt das angepasste erste Ficksche Gesetz:

$$J = \frac{dn}{Adt} = -D \frac{c_{\text{innerhalb}} - c_{\text{außerhalb}}}{d}$$

$c_{\text{innerhalb}}$: Gaskonzentration innerhalb des Tonzylinders

$c_{\text{außerhalb}}$: Gaskonzentration außerhalb des Tonzylinders

d : Dicke des Tonzylinders

Die Größe

$$P = \frac{D_i}{d}$$

ist eine vereinfachte Permeabilitätskonstante der Membran, bzw. des Tonzylinders für die Diffusion von Wasserstoff in einer Wasserstoffatmosphäre:

$$\frac{dn}{dt} = -D_i (c_{\text{innerhalb}} - c_{\text{außerhalb}})$$

Submikroskopische quantitative Interpretation

Mittleres Verschiebungsquadrat eines Teilchens

Alle Teilchen eines Teilchensystems kollidieren permanent miteinander. Mathematisch werden über die Bewegungseigenschaften statistische Aussagen gemacht, da die Wechselwirkungen der Teilchen zu komplex sind (vor allem, wenn mehrere Teilchensorten und Feldkräfte mitspielen). Im zeitlichen Mittel wird der aus den Kollisionen resultierende Bewegungsvektor eines Teilchens in einem System ohne Feldkräfte und mit elastischen Kollisionen verschwinden, hingegen nicht das mittlere Verschiebungsquadrat.

Bei j Stößen und einer mittleren Weglänge von

λ gilt für das mittlere Verschiebungsquadrat $\overline{x^2}$, wenn ein eindimensionales System in x -Richtung betrachtet wird:

$$\overline{x^2} = j\lambda^2$$

Weil $j\lambda$ gleich dem in der betreffenden Zeit t bei einer Teilchengeschwindigkeit u zurückgelegten Weg ist, gilt:

$$\lambda = ut$$

bzw.

$$\overline{x^2} = u\lambda t$$

Die mittlere Verschiebung eines Teilchens wächst also mit der Wurzel der Zeit.

Submikroskopische Ableitung des ersten Fickschen Gesetzes

In einem Zylinder, der mit einem Gas mit einem stationären Dichtegradienten gefüllt ist, betrachte man eine Stelle x . Aus einem Abschnitt $x-\Delta x$ tritt die Hälfte der dort diffundierenden Teilchen durch die Fläche A des Zylinders:

$$n_1 = \frac{1}{2} A \Delta x N_A \left(c_x - \frac{1}{2} \frac{dc}{dx} \Delta x \right)$$

bzw. für den Abschnitt $x+\Delta x$:

$$n_2 = \frac{1}{2} A \Delta x N_A \left(c_x + \frac{1}{2} \frac{dc}{dx} \Delta x \right)$$

Für $\Delta n = n_1 - n_2$ ergibt sich:

$$\Delta n = -\frac{1}{2} A \Delta x N_A \frac{dc}{dx} (\Delta x^2)$$

bzw. in differentieller Schreibweise und mit

$$\overline{x^2} = u\lambda t$$

$$\frac{dn}{dt} = -A \frac{1}{6} \lambda u \frac{dc}{dt} \text{ bzw.}$$

$$\text{Mit } D = \frac{1}{6} \lambda u$$

ergibt sich mit

$$\frac{dn}{dt A} = J = -\frac{1}{6} \lambda u \frac{dc}{dt}.$$

der makroskopische Ausdruck des Fickschen Gesetzes dieser abgeleiteten Gesetzmäßigkeit. Der Diffusionskoeffizient J ist also eine einfache Funktion der mittleren Weglänge λ und der mittleren Teilchengeschwindigkeit u .

Diffusion durch eine Membran

Analog zur makroskopischen Behandlung nehme ich an, dass sich nach einer gewissen Zeit nur noch Teilchen des diffundierenden Stoffes in der Apparatur befinden und sich eine stationäre Teilchenkonzentration etwa linearer Art in x -Richtung ausgebildet hat. Aus einem bestimmten Volumen A vor dem Zylinder trifft durchschnittlich die Hälfte aller Teilchen den Zylinder (weil sich durchschnittlich nur die Hälfte auf ihn zu bewegt). B ist der Bruchteil der treffenden Teilchen, der den Tonzylinder passieren kann.

Damit kann die Diffusion durch den Tonzylinder fast analog zur einfachen Diffusion behandelt werden, der Unterschied besteht darin, dass im stationären Gleichgewicht der Nettofluss J um einen Faktor B (< 1) verringert wird, der ausdrückt, dass von beiden Seiten nur ein Bruchteil der Teilchen die Barriere passieren können. Es gilt:

$$J = -B \frac{1}{6} \lambda u \frac{dc}{dt}$$

Das Austreten von Gasblasen bei der Diffusion von Wasserstoff kann nur beobachtet werden, solange sich das Gleichgewicht noch einstellt. Danach besteht außerhalb des Tonzylinders unter dem Glaszylinder und innerhalb des Tonzylinders eine mehr oder weniger reine Wasserstoffatmosphäre von etwa 1 bar.

3.2.3.2 Fachwissenschaftliche Grundlagen der zweiten Aufgabe: Brownsche Bewegung von Rauchteilchen in Luft

Wie oben erwähnt beschränkt sich die hier zur fachwissenschaftlichen Interpretation der Brownschen Bewegung vorgestellte Erklärung auf die Zurückführung der makroskopisch quantitativ beschriebenen Brownschen Bewegung auf das hypothetische Teilchenmodell und lässt deshalb die Darstellungen z.B. von Einstein, Langevin oder Smoluchowski ausser Acht, die die Brownsche Bewegung als statistische Bewegung von Suspensionsteilchen in einer viskosen Flüssigkeit, also makroskopisch, beschrieben (Dahlmann, 1997). Diese Erklärungsansätze sind hier nur soweit von Interesse, als sie die prinzipielle Mehrdeutigkeit makroskopischer Phänomene belegen.

Makroskopische quantitative Interpretation

Das zweite Ficksche Gesetz beschreibt die Konzentrationsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit und der/den Ausbreitungsdimension/en. Die Form der Funktion als Normalverteilung lässt erkennen, dass keine Bewegungsrichtung der diffundierenden Teilchen bevorzugt ist und sich im zeitlichen Mittel ein Wert von 0 für die durchschnittliche Verschiebung eines Teilchens ergeben muss. Das quadrierte Mittel hingegen nimmt einen positiven Wert ein.

Für eine beliebige Anfangsverteilung gilt (siehe auch Ackermann, 1992, S.128f):

$$dc(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}} f(\xi) d\xi$$

Ist der Ausgangszustand ein Rechteck der Höhe c_0 und der Breite b (auf der x-Dimension), so gilt:

$$c(x,t) = \frac{c_0 b}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Für das Integral von $c(x,t)$ über x gilt der Mittelwertsatz der Integralrechnung:

$$\overline{x^2} c_0 b = \frac{c_0 b}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dx$$

Das Integral lässt sich mit der Rekursionsformel lösen. Man erhält nach Vereinfachung:

$$\overline{x^2} c_0 b = 2Dt$$

Damit ist das mittlere Verschiebungsquadrat eines Teilchens in einem Medium als Funktion der Beobachtungszeit und der Diffusionskonstante beschrieben.

Submikroskopische quantitative Betrachtung

Auf der Ebene des Partikelmodells wird die Brownsche Bewegung auf der submikroskopischen Ebene mit Hilfe des mittleren Verschiebungsquadrats jedes Teilchens erklärt, analog zur Deutung der „Diffusion“ (siehe dort):

$$\overline{x^2} = u\lambda t$$

Fachwissenschaftliche Grundlagen der dritten Aufgabe: thermische Expansion von Luft

Die quantitativen makroskopischen Aspekte der Gasexpansion wurden bereits in Abschnitt zum idealen bzw. realen Gasmodell beschrieben. Den Versuchsaufbau soll der mit Beschriftungen versehener Screenshot eines Videos zur thermischen Luftexpansion in Abb. 3.5 verdeutlichen.

In den folgenden beiden Abschnitten wird zunächst die thermische Expansion eines idealen, und dann eines realen Gases auf der submikroskopischen Ebene beschrieben.

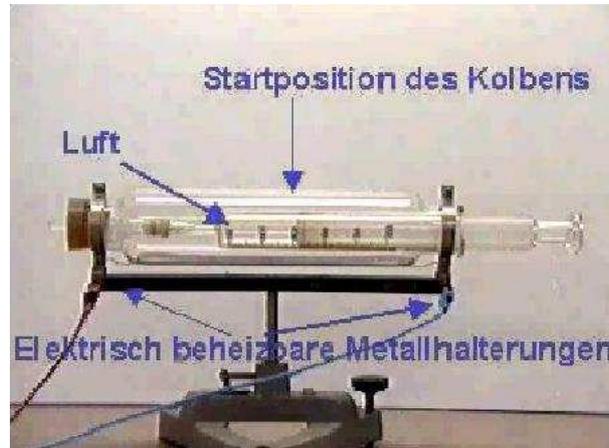


Abbildung 3.5: Screenshot des Versuchsaufbaus zur thermischen Luftexpansion (Aufnahme von Andre Hollstein)

Thermische Expansion eines idealen Gases

In der kinetischen Gastheorie erfolgt die thermische Gasexpansion (bei gleich bleibenden Druckverhältnissen), weil die Gasteilchen bei höherer Temperatur öfter und heftiger gegen die Behälterwände treffen. Der bewegliche Kolben wird deshalb so weit nach außen getrieben, bis ein Kräftegleichgewicht zwischen dem Gasdruck außerhalb und dem innerhalb des Kolbenprobers besteht. Wegen der großen Zahl der Gasteilchen (2g Wasserstoff enthalten z.B. $6.023 \cdot 10^{23}$ Teilchen) wirken die diskreten Impulse makroskopisch wie ein kontinuierlicher Druck. Im Folgenden wird zuerst der quantitative Zusammenhang zwischen dem Druck und dem Volumen bestimmt, bevor die Beziehung zwischen makroskopischer Gastemperatur und Gasvolumen behandelt wird.

Bei der Kollision eines einzelnen Teilchens mit einer unbeweglichen Gefäßwand ergibt sich bei elastischer Kollision für die x-Komponente der Teilchengeschwindigkeit für eine Geschwindigkeitsänderung $+v_x$ nach $-v_x$ die Impulsänderung von $2mv_x$. In einem geschlossenen Gefäß beträgt die Anzahl der Stöße des einen Moleküls pro Zeiteinheit auf eine Wand (das kursive Symbol v steht hier für den Geschwindigkeitsvektor, das nicht-kursive Symbol v für den Geschwindigkeitsbetrag):

$$\frac{|v_x|}{2l} .$$

l : Länge des Gefäßes in x-Richtung

Damit gilt für die Kraftübertragung pro Zeiteinheit (der Vollständigkeit halber in Klammern der jeweilige Ausdruck für ein reales Gas):

$$F_x = 2mv_x \frac{v_x}{2l}$$

Da der Druck als Kraft pro Flächeneinheit definiert ist, ergibt sich folgender Ausdruck für den Druck eines Teilchens auf die Wand in x-Richtung:

$$p = mv_x \frac{v_x}{3V}$$

Da der Wert der orthogonalen Geschwindigkeitskomponente des dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektors v beträgt, ergibt sich für den Druck, den n Mol eines Gase auf die Wand in x-Richtung ausüben (N_A ist die Avogadro'sche Zahl der Teilchen eines Mols: $6.023 \cdot 10^{23}$):

$$p = \frac{nN_A m \overline{v^2}}{3V}$$

Für ein variables Volumen in Abhängigkeit von der Gasmenge (ausgedrückt durch die Anzahl n der Mole und die Avogadro'sche Zahl), der Masse m eines einzelnen Teilchens, $\overline{v_x^2}$ und dem Druck p ergibt sich damit:

$$V = \frac{nN_A m \overline{v^2}}{3p}$$

Im nächsten Schritt wird die quantitative Beziehung zwischen makroskopischer Temperatur und Druck bestimmt.

Die mittlere kinetische Translationsenergie eines Gasteilchens beträgt:

$$\overline{E} = \frac{1}{2}m\overline{v}^2$$

Erweitert man den Bruch in

$$p = \frac{nN_A m \overline{v}^2}{3V}$$

mit 2 und setzt \overline{E} ein, ergibt sich:

$$p = \frac{2nN_A \overline{E}}{3V}$$

und mit

\overline{E}_{mol} , der Translationsenergie von N_A Teilchen:

$$p = \frac{2n\overline{E}_{mol}}{3V}$$

Der Druck p ist also abhängig von der Molanzahl, der Translationsenergie eines Mols Teilchen sowie vom Volumen des Gases.

Nun kann die umgeformte makroskopische Gleichung

$$p = \frac{nRT}{V}$$

mit der Gleichung

$$p = \frac{2nN_A \overline{E}}{3V},$$

deren rechte Seite die submikroskopische kinetische Teilchenenergie beschreibt, verglichen werden. Akzeptiert man, dass die submikroskopische Beschreibung des Drucks der makroskopischen entspricht, dann kann man die rechten Seiten gleichsetzen:

$$\frac{nRT}{V} = \frac{2nN_A \overline{E}}{3V}$$

$$\Leftrightarrow \overline{E}_{mol} = \frac{3RT}{2}$$

Diese Gleichungen sagen aus, dass die submikroskopische kinetische Translationsenergie der Gasteilchen eines idealen Gases direkt proportional der makroskopischen Temperatur eines Gases ist. Damit wird die nichttriviale Beziehung zwischen der makroskopischen Gastemperatur und der mittleren kinetischen Translationsenergie der Teilchen quantitativ formuliert. Diese Gleichung beruht darauf, dass die Modellbeziehung zwischen makroskopischem und submikroskopischem Druck und die Newtonsche Mechanik für punktförmige Teilchen akzeptiert wird. Dann liefert sie eine Modellrelation zwischen submikroskopischer mittlerer Translationsenergie der Gasteilchen und der makroskopischen Temperatur.

Formt man die allgemeine Gasgleichung um zu:

$$T = \frac{pV}{nR}$$

und die Gleichung

$$\overline{E}_{mol} = \frac{3RT}{2}$$

zu:

$$T = \frac{2\overline{E}_{mol}}{3R}$$

so ergibt sich, wenn man die rechten Seiten der Gleichungen gleichsetzt:

$$\frac{pV}{nR} = \frac{2\overline{E}}{3R}$$

bzw.

$$V = \frac{2n\overline{E}_{mol}}{3p}$$

Diese Gleichung beschreibt die Abhängigkeit des Volumens von mittlerer Translationsenergie, Gleichgewichtsdruck im Kolbenprober und der Menge des Gases (in mol).

Thermische Expansion eines realen Gases

Für ein ideales Gas war für den submikroskopischen Druck von N_A Teilchen auf eine Wand folgender Ausdruck abgeleitet worden:

$$p = \frac{2n\overline{E}_{mol}}{3V}$$

In der van-der-Waals-Gleichung gilt nun für den Druck:

$$(p + a\frac{n^2}{V^2})(V - nb) = nRT$$

Gleichsetzen von

$$p = \frac{2n\overline{E}_{mol}}{3V}$$

mit

$$p = \frac{nRT}{V-nb} - a(\frac{n^2}{V^2})$$

und Auflösen nach ergibt:

$$\overline{E} = \overline{E}_{mol} = \frac{2(Van - RTV^2 - abn^2)}{2V(V - bn)}$$

Hier gilt die einfache Beziehung zwischen \overline{E} und T nicht mehr. Vielmehr hängt \overline{E} wegen der Anziehungskräfte zwischen den Teilchen auch vom Volumen und den intermolekularen Wechselwirkungen ab (s.a. Joule-Thompson Effekt).

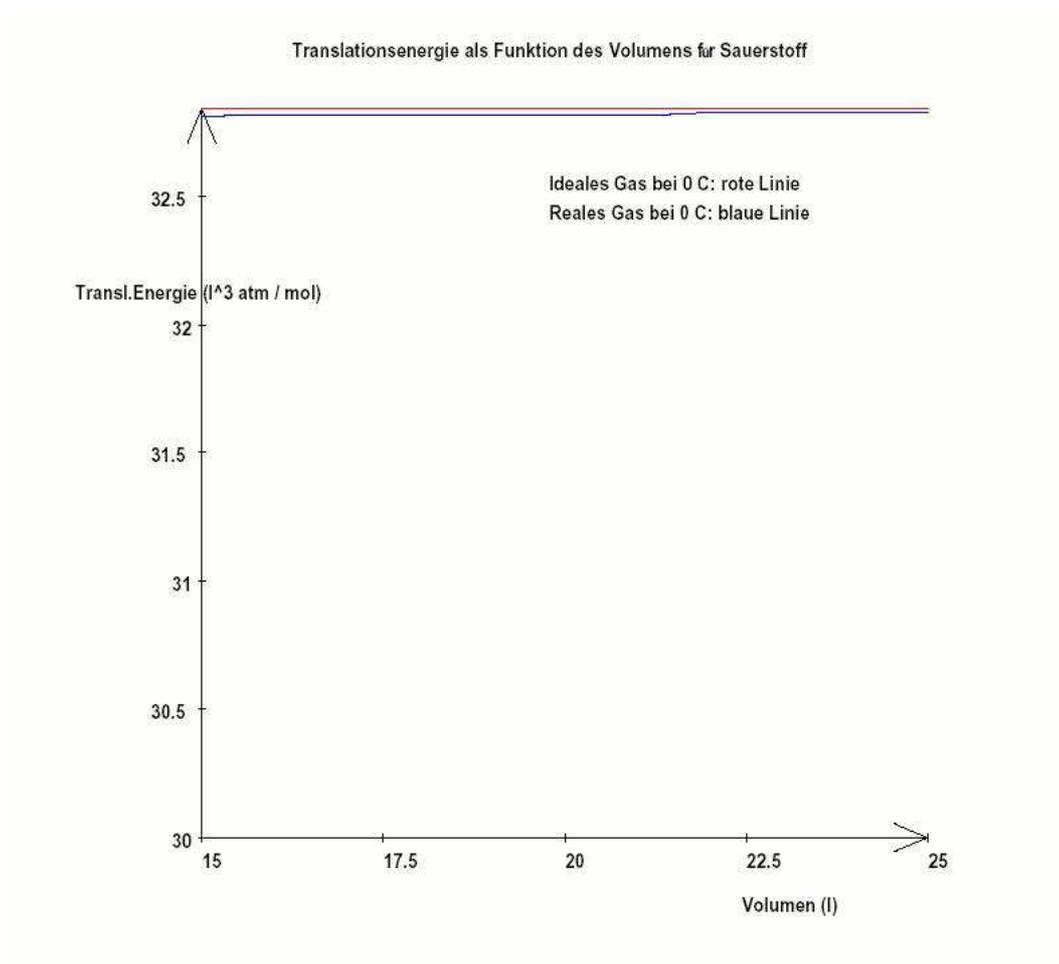


Abbildung 3.6: Translationsenergie als Funktion des Volumens von Sauerstoffgas abhängig von der Darstellung als ideales und als reales Gas.

Nach Gleichung

$$\overline{E}_{mol} = \frac{2(Van - RTV^2 - abn^2)}{2V(V - bn)}$$

ist die Translationsenergie der Gasteilchen abhängig vom makroskopischen Volumen und von der makroskopischen Temperatur des Gases. Damit kann das makroskopische Volumen nicht mehr

- wie im Fall eines idealen Gases - ausschließlich als Funktion von submikroskopischem Druck und submikroskopischer Translationsenergie bestimmt werden. Vielmehr ist das makroskopische Volumen sowohl von der submikroskopischen Translationsenergie der Teilchen als auch von der makroskopischen Temperatur abhängig. Das bedeutet, dass sowohl die unabhängige als auch die abhängige makroskopische Variable des Experiments der thermischen Gasexpansion in die Modellbeziehung für die unabhängige, aber auch für die abhängige submikroskopische Modellvariable eingehen.

Damit kann für die streng quantitative Berechnung der Argumentationsgang des idealen Gases (Berechnung der Translationsenergie aus der Temperatur, gefolgt von der Berechnung des Volumens aus der Translationsenergie) nicht auf das reale Gas übernommen werden. Allerdings ist der Effekt des makroskopischen Volumens auf die Translationsenergie für die Zwecke dieser Arbeit vernachlässigbar klein, wie Abbildung 3.6 für Sauerstoff bei Normalbedingungen zeigt (die Sprünge der Kurven in der Abbildung werden durch die graphische Darstellung der Funktionen mithilfe eines Computeralgebrasystems verursacht, treten aber in hier nicht realisierbaren feineren Auflösungen nicht auf).

3.3 Das Erlernen des Teilchenmodells: didaktische Untersuchungen, Erklärungen und Konsequenzen

3.3.1 Exemplarische Studien zu Alltagsvorstellungen von Gasen und ihr Korrelat zum submikroskopischen Teilchenmodell

Es gibt eine Vielzahl von Studien über Alltagsvorstellungen von Gasen, die Zahl der Studien über die Beziehungen von makroskopischen Vorstellungen zur submikroskopischen Teilchenebene ist kleiner (z.B. Anderson, 1990; Benson, Wittroch & Baur, 1993; Ben-Zvi, Eylon & Silberstein, 1986; Driver et al., 1994; Ebenezer & Frickson, 1996; Griffith & Preston, 1996; Kircher, 1986; Novick & Nussbaum, 1981; Pfundt, 1981; Renström, Andersson & Marton, 1990; Serè, 1986). Eine Zusammenstellung vieler Arbeiten lieferten Duit & Pfundt (1994), bzw. Duit (2004).

Für das zentrale Thema dieser Arbeit, die Erarbeitung einer kognitionspsychologischen Prozessvorstellung des Teilchenmodellerwerbs reicht eine Vorstellung weniger charakteristischer Befunde aus weil

- die Befunde zu Alltagsvorstellungen schon oft beschrieben wurden (z.B. Hollstein, 2001, Mikelskis-Seiffert, 2002 u.v.a.),
- die kognitiven Lernprozesse in diesen Arbeiten nicht im Detail analysiert wurden,
- sich die für diese Arbeit wichtigen theoretischen und empirischen Befunden bezüglich des individuellen Lernprozesses beim Erwerb des Teilchenmodells meist mit analogiebasierten Erwerbsprozessen interpretieren lassen.

Im Folgenden werden charakteristische Befunde zu Alltagsvorstellungen von Gasen am Beispiel der Studien von Brook & Driver (1989), Pfundt (1981) und Stavy (1988) beschrieben, die auch für den Forschungsstand im Jahr 2004 noch prototypische Ergebnisse lieferten.

Nach Brook & Driver (1989) sind viele etwa fünfjährige Kinder davon überzeugt, dass Luft überall existiert. Allerdings identifizieren sie Luft nur in Situationen, in denen sie leicht wahrgenommen werden kann, etwa in Form von Wind, Wolken oder aufsteigenden Ballons. Einige wissen, dass Luft eine Rolle beim Atmen spielt. Aber es treten auch naive Konzepte auf, die in klarem Gegensatz zum wissenschaftlichen Modell der Gase stehen: Fast die Hälfte der untersuchten Stichprobe nimmt an, dass in einem geschlossenen Behälter keine Luft existiert, während lediglich ein Drittel angibt, dass Luft Raum einnimmt. Später, etwa im Alter von acht Jahren, sind die meisten davon überzeugt, dass Luft in einem geschlossenen Gefäß enthalten ist (wo es natürlich nicht bemerkt

werden kann) und beim Atmen eine Rolle spielt. Zwischen fünf und acht Jahren zeigt sich eine weitere interessante Entwicklung: Während die meisten fünfjährigen Kinder das Gewicht von Luft proportional zu ihrem Volumen schätzen, ordnet etwa ein Viertel von ihnen mit acht Jahren der Luft gar kein Gewicht mehr zu, einige sind sogar überzeugt, dass Luft ein negatives Gewicht besitzt. Scheinbar erschließen die achtjährigen Kinder diese Gewichtseigenschaft daraus, dass Luft schwebt oder sogar aufsteigt (Brook & Driver, 1989; Stavy, 1988). Eine andere markante Alltagskonzeption betrifft das Konzept der Wirkung unterschiedlicher Luftdrücke: Kinder im Alter von acht Jahren glauben oft, dass der Inhalt partiell oder komplett evakuierter Gefäße aktiv saugt. Ein Beispiel dafür ist der Strohhalm, mit dem man Saft trinkt (Brook & Driver, 1989). Bis zum Alter von etwa zwölf Jahren erhalten sich bei vielen Kindern einige der genannten Alltagskonzepte: Mehr als 75% sind davon überzeugt, dass Luft kein oder negatives Gewicht hat. Die Hälfte denkt, dass die übrig gebliebene Luft in einem teilevakuieren Gefäß aktiv saugt. Nur wenige Kinder wissen, dass Luft Kräfte in alle Richtungen ausübt (Brook & Driver, 1989). Bei vielen Jugendlichen im Alter von etwa sechzehn Jahren scheinen dann etliche der ursprünglichen Alltagsüberzeugungen verschwunden zu sein. Dennoch beharrt ein beträchtlicher Teil auf einigen oberflächenorientierten Konzepten ihrer Kindheit (Brook & Driver, 1989). Oberflächenorientierung bedeutet hier, dass die wahrnehmbaren Eigenschaften eines Stoffs das mentale Stoffkonzept dominieren, während bei einer Tiefenstrukturorientierung diejenigen theoretischen Stoffkonzepte stärker dominieren, die zur „richtigen“ (d.h. hier, von abstrakten wissenschaftlichen Konzepten des Teilchenmodells geleiteten) Erklärung von Stoffphänomenen gebraucht werden. Diese typischen empirischen Ergebnisse verdeutlichen das Bild von Luft, dass sich Kinder durch ihre Alltagserfahrungen mit dem Gasgemisch aufbauen.

Für die bei der Bildung einer ersten Teilchenvorstellung auftretende Vermischung der makroskopischen mit der submikroskopischen Ebene wird hier die Arbeit von Pfundt (1981) stellvertretend für viele andere empirischen Arbeiten genannt. Pfundt (1981) erklärte ihre Ergebnisse damit, dass Jugendliche die kleinsten Teilchen als Produkt eines Teilungsprozesses und nicht als vorgegebene Bausteine der Materie verstehen. Ein anderes Beispiel stammt einer Untersuchung von Stavy (1988), in der viele Versuchspersonen annahmen, dass Teilchen verschwinden, wenn eine Flüssigkeit oder ein Feststoff verdampft. Wenn Jugendliche ab den ersten Lektionen über das Teilchenmodell nach ihren Vorstellungen vom Aufbau der Materie befragt werden, treten solche und andere charakteristische Mischkonzepte als Bestandteile zum Beispiel eines Teilchenmodells der Luft auf. Sie werden in vielen empirischen Studien aufgezeigt (im Einzelnen dazu: Hollstein, 2001, Mikelskis-Seifert 2002, Vollebregt 1998). Lernpsychologisch gesehen lässt sich diese „Vermischung“ zwanglos als Resultat analoger Übertragungen von Alltagskonzepten auf das bereits gebildete Teilchenkonzept beschreiben und genauer untersuchen. Dass analoge Übertragungen zu Vermischungen von Eigenschaften verschiedener Ebenen Vermischungen (also zu Mischkonzepten) führen können, wurde in der Literatur zum analogen Lernen an verschiedenen Stellen gezeigt (s. weiter unten den Abschnitt zum Lernen mit Analogien).

Eine wichtige Ursache dafür, warum Übertragungen der uns vertrauten Eigenschaften von Tisch und Stühlen, von Farben und Gerüchen, von Temperatur und Siedepunkt etc. auf den Bereich der Moleküle, Atome und Elementarteilchen problematisch sind, bezeichnet der Begriff der „Andersweltlichkeit“ der atomaren Ebene (Fladt & Buck, 1996): Weil die Teilchenwelt „andersweltlich“ ist, dürfen wir eigentlich viele Eigenschaften nicht von der makroskopischen Seite aus auf das Teilchenmodell übertragen und haben dementsprechend für wichtige Eigenschaften der Teilchen keine sinnlichen Erfahrungen verfügbar.

In vielen Arbeiten wird bezüglich der entsprechenden Lernvorgänge zwar erwähnt, dass die Versuchspersonen wahrscheinlich unkritisch makroskopische Eigenschaften auf die andersweltliche Teilchenebene übertragen, allerdings fehlt bis jetzt eine detaillierte Analyse dieses Lernvorgangs, der für die individuellen Modellbildungsprozesse über die Bildung von „Fehlvorstellungen“ des Teilchenmodells hinaus eine zentrale Bedeutung hat. Mikelskis-Seifert (2002, S. 17) fasst den Forschungsstand zur Beschreibung und Bildung der typischen Teilchenkonzepte von Schülerinnen und Schülern folgendermaßen zusammen.

„Eigenschaften der makroskopischen Körper, wie Temperatur und Farbe, werden auf die kleinsten

Teilchen übertragen.

Es besteht die Vorstellung, dass sich zwischen den Teilchen eines Stoffes Luft befindet.

Die Bewegung von Teilchen wird mit Reibung verbunden und hört somit nach gewisser Zeit von selbst auf.

Es besteht die Vorstellung, dass sich zwischen den Teilchen eines Stoffes derselbe Stoff in kontinuierlicher Form befindet (zum Beispiel Wasser zwischen den Wasserteilchen).“

Der Punkt 1, der die analoge Übertragung als den die Alltagskonzepte generierenden kognitiven Vorgang betrifft, ist der zentrale. Denn die Punkte 2, 3 und 4 lassen sich als Beispiele der analogen Übertragungsergebnisse makroskopischer Alltagsvorstellungen auf die neu gebildete Teilchenmodellvorstellung interpretieren.

Die für die Thematik dieser Arbeit zentrale Hypothese zur Erklärung der Resultate vieler empirischer Arbeiten zu mentalen Teilchenkonzepten lautet, dass Schülerinnen und Schüler bei der Bildung der ersten Teilchenmodelle der Stoffe in der Schule oft spontan ihre makroskopischen Alltagskonzepte durch Mechanismen des analogen Lernens auf das neu zu bildende Teilchenmodell der Stoffe übertragen. Sie prüfen die Übertragung der makroskopischen Konzepte auf das andersweltliche Teilchenmodell nicht so kritisch, wie das die Modelltheorie und die stellenweise fehlende Selbstähnlichkeit von Stoff und hypothetischen Teilchen eigentlich erforderten. Zusammenfassend trennen sie also nicht genügend zwischen der makroskopischen Phänomenwelt und der submikroskopischen Teilchenwelt.

3.3.2 Exemplarische didaktische Vorschläge zur expliziten Thematisierung der “Andersweltlichkeit” der Teilchenvorstellungen.

3.3.2.1 Lernen über Modelle

Mikelskis-Seifert (Mikelskis-Seifert 2002; Seifert & Fischler, 1999) hat den für die Modellproblematik des Teilchenmodellerwerbs relevanten Vorschlag gemacht, mehrere Ebenen der externen Repräsentation zu kombinieren und sie im Hinblick auf die Metaprobleme des Modellwissens während des Unterrichts explizit zu thematisieren: Aus der Erfahrungswelt schlägt sie die makroskopischen Ebenen der Alltagserfahrungen, der realen und der Gedankenexperimente vor. Die submikroskopischen Modellebenen enthalten die Ebenen der propositionalen und der bildlichen Modellbeschreibung, die Ebenen der dynamischen Modelle, sowie zum Schluss die Ebene der mathematischen, also maximal abstrakten Modelle. Über allem schwebt die Metaebene (Metacognitive Reasoning), auf der über die Eigenschaften und Beziehungen der Beobachtungen und verschiedenen Modellebenen argumentiert wird. Stellenweise bleibt unklar, inwieweit die Ebenen auf einer vertikalen Abstraktionshierarchie angeordnet sind, oder inwieweit sie horizontal nebeneinander liegen und unterschiedliche, nicht voneinander ableitbare Modellvorstellungen vermitteln. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang bleibt, wo genau Nutzen und Geltungsgrenzen der einzelnen Modelle liegen und nach welchen Kriterien Nutzen und Grenzen der einzelnen Modellebenen bemessen werden.

Ebene der konkreten Experimente	Erfahrungswelt
Ebene der fiktiven Experimente	
Ebene der Alltagsvorstellungen	
Ebene der Modelldeskription	Modellwelt - Physikwelt
Ebene der ikonischen Modelle	
Ebene der enaktiven, simulativen Modelle	
Ebene der mathematischen Modelle	

Tabelle 3.1: Ebenen, die beim Erwerb des Teilchenmodells nach Mikelskis-Seifert (2002) eine Rolle spielen.

Mikelskis-Seifert setzt also auf Metakognition, um das Anderweltlichkeitsproblem in den Griff zu

bekommen. Sie diskutiert Lernen und Lehren über Teilchenmodelle aus verschiedenen Perspektiven (Ergebnisse verschiedener empirischer Untersuchungen zum Lernen des Teilchenmodells, verschiedene didaktische Ansätze, erkenntnistheoretische Perspektive, Lernen mit multiplen Repräsentationen) und kommt aus jeder Perspektive zu dem Ergebnis, dass ein Unterricht über das Metakonzept „Modelle“ angezeigt sei. Dieses metakonzeptuelle Wissen über die Eigenheiten wissenschaftlicher Modelle will die Autorin verbessern, indem sich die Lernenden in einem Unterrichtsworkshop mit der Mehrebenenpräsentation von chemisch-physikalischen Phänomenen und ihrer Modellinterpretation auseinandersetzen. Der Workshop-Ansatz ihres Unterrichtsvorschlags versucht, in einem geführten Ansatz die Lernenden zum entdeckenden Lernen, zum selbstständigen Entwickeln neuer Gedankenansätze zu bewegen (Mikelskis-Seifert, 2002, S.115f). Die Schülerinnen und Schüler sollen von eigenen Erfahrungen und Beobachtungen ausgehend, in Gruppen- und Plenumsarbeit lernen, Vorgänge zu beschreiben und auf der Modellebene zu deuten, modellgestützte Vorhersagen zu treffen und diese anhand der entsprechenden empirischen Ergebnisse weiter zu bearbeiten.

Die Frage nach den kognitiven Prozessen bei der Arbeit mit dem jeweiligen externen Repräsentationssystem war nicht Bestandteil der Problemstellung von Mikelskis-Seifert. Die Autorin beschreibt eher den Unterrichtsgang ganzer Lerngruppen, wenn zum Beispiel Vorgaben für die Gruppenarbeit oder Ergebnisse von Diskussionen (beispielsweise die Erarbeitung der Teilchenvorstellung bei der thermischen Volumenexpansion von Flüssigkeiten (Mikelskis-Seifert, 2002, Anhang I) angegeben werden. Die Analyse der individuellen Lernprozesse, die die Einzelnen während eines solchen Unterrichts leisten, bleibt für die Zukunft zu klären: Welche kognitiven Prozesse sind z.B. involviert? Wie genau leisten Schülerinnen den flexiblen Umgang mit den multiplen Repräsentationen der verschiedenen Ebenen (s.a. Plötzner, 1998)? Wo lauern Überforderungen und Fallstricke beim Umgang mit solch vielfältiger Information? Erst nach einer Auseinandersetzung mit diesen lernpsychologischen Fragestellungen lässt sich meines Erachtens umfassend beurteilen, wo für die Schülerinnen und Schüler insgesamt Stärken und Schwächen des Ansatzes liegen. Die vorliegende Arbeit nimmt sich dementsprechend nur den Ausschnitt der Beziehung der Ebene der einfachen Stoffphänomene und der Ebene der dynamischen Teilchenmodelle vor, um daran die Probleme der individuellen Lernprozesse zu untersuchen.

3.3.2.2 Der problemsetzende Ansatz (Vollebregt, 1998)

Vollebregt (1998) schlägt einen problemsetzenden Ansatz vor, in dem die stoffimmanenten Probleme für eine Lernreihe benutzt werden, die den Schülerinnen bewusst machen soll, wo und warum sie sich in einem Lerngang an einer bestimmten Stelle befinden. Sie orientiert diesen Lehr- und Lerngang an übergeordneten Gesichtspunkten: Vollebregt geht davon aus, dass das makroskopische und teilchenmodellbezogene Vorwissen entscheidend für den Lernerfolg ist und der Lerngang ständig darauf bezogen sein muss. Die Schülerinnen und Schüler sollten außerdem im Verlauf des Unterrichts immer darüber orientiert sein, wo genau sie sich gerade im Gang der Einheit befinden. Wenn das auch in der Arbeit nicht formuliert wird, so scheint Vollebregt implizit die Eigenschaften der Modellebene und der Modellrelationen zur Sequenzierung ihres Vorschlags benutzt zu haben. Weiterhin scheint sie anzunehmen, dass das Erlernen des Teilchenmodells als hoch abstraktes Erklärungsmodell der Materie weniger mit alltagsnahen praktischen, als vielmehr mit eher alltagsfernen Erkenntnismotiven initiiert werden soll. In beiden Punkten stimme ich mit ihr überein, glaube jedoch, dass hier ebenfalls mit der lernpsychologischen Analyse ein entscheidender Bereich fehlt, ohne den solche Lernprozesse nur schwer zu beurteilen sind. Die Autorin führt das Teilchenmodell unterrichtspraktisch über eine Computersimulation ein (wie diese Arbeit), die sich allerdings am idealen Modell der Gase orientiert (im Gegensatz zu dieser Arbeit).

3.3.2.3 Der systemorientierte Ansatz (Buck, 1994, 2004)

Buck (z.B. Buck 1987, Buck, 1990, Buck, 1994, Buck, Rehm & Seilnacht, 2004) hat vorgeschlagen, das Verhältnis von makroskopischen Systemen und ihren (nicht selbst-ähnlichen) Komponenten (Schlöpke, 1987) zum Ausgangspunkt einer Annäherung zu machen. Auf diese Weise, so seine

Annahme, könne die ungerechtfertigte Übertragung von Oberflächeneigenschaften auf die kleinsten Aufbaueinheiten der Stoffe vermieden werden.

Der wissenschafts- und modelltheoretische Ansatz dieser Arbeit unterscheidet sich vom phänomenologisch orientierten Ansatz von Buck beispielsweise darin, dass für diese Untersuchung die Allgemeine Modelltheorie zugrunde gelegt wird, die für Buck keine direkt ersichtliche Bedeutung besitzt (s. auch Kap.2). Während im Ansatz der Modelltheorie das Verhältnis zwischen Phänomenen und Teilchenmodell mit den Modellrelationen zwischen der Phänomenwelt und der von ihr strikt getrennten hypothetischen Modellwelt beschrieben wird, benutzt Buck die systemische Beschreibungsweise vom Ganzen und seinen dieses Ganze nach eigenen Gesetzen bildenden Teilen.

Aus der Sicht des Ansatzes dieser Arbeit versucht Buck, die Systemverschachtelung sowie die Selbst(un)ähnlichkeit zwischen dem Systemganzen und seinen Bestandteilen aus bekannten Wirklichkeitsbereichen (den Quellbereichen, ein Beispiel könnte die Systembetrachtung des Menschen, seiner Organe und Zellen sein) per Analogie auf die Welt der Stoffe übertragen zu lassen. Er beabsichtigt dabei, dass die Schülerinnen und Schüler insbesondere die erwähnte Selbstunähnlichkeit zwischen System und Systembestandteilen des Quellbereichs auf die Stoffe übertragen und damit letztlich die unhinterfragten analogen Übertragungen makroskopischer Stoffeigenschaften auf die Teilchenwelt hemmen. Zwar besteht theoretisch sicher die Möglichkeit, dass nach einer Einführung der abstrakten Betrachtungsweise von Systemganzen und seiner Bestandteile Schülerinnen und Schüler weniger oft unreflektiert makroskopische Stoffeigenschaften auf die Teilchenwelt übertragen. Der Effekt dieser Vorgehensweise müsse nach der Auffassung dieser Arbeit aber empirisch geprüft werden. Vom kognitionspsychologischen Standpunkt aus bestehen Zweifel an einem starken Effekt dieses Vorgehens, denn analoge Denk- und Lernprozesse sind für Menschen (und nicht nur für sie) zentral und allgegenwärtig (Gentner, Holyoak & Kokinov, 2001; Hofstadter, 2001) und laufen insbesondere bei Kindern oft unbewusst und automatisch ab (Goswami, 2001). Die bewusste und kritische Bildung von Modellrelationen zwischen zwei Bereichen ist demgegenüber ein schwierigerer und Ressourcen beanspruchender Prozess. beim unbewussten analogen Lernen übertragen Schülerinnen und Schüler automatisch die Eigenschaften des makroskopischen Stoffs auf sein Teilchenmodell, sobald beide Bereiche subjektiv hinreichend ähnlich wirken. Für diese Sichtweise sprechen jedenfalls die vielen und immer wieder in die gleiche Richtung weisenden Befunde über Alltagskonzepte über das Teilchenmodell, die einfacher durch die große Bedeutung unbewusst ablaufender analoger Denkprozesse als durch den Einfluss verbesserungswürdiger Unterrichts- und Schulbuchgestaltung erklärt werden kann (siehe dazu z.B. Mikelskis-Seiffert, 2002).

Wegen der natürlich und spontan ablaufenden analogen Lernprozesse scheint es deshalb psychologisch angemessener, zunächst einmal die analoge Übertragung von Alltagskonzepten der Stoffe auf das Teilchenmodell zu akzeptieren und danach in weiteren Lernprozessen das initial gebildete Modell zu modifizieren (wofür das Lernen über Modelle und der Systemansatz hilfreiche Vorschläge sind). Im Übrigen können auch für die Korrektur von einmal gebildeten Teilchenmodellvorstellungen analoge Lernprozessvorstellungen benutzt werden (Burstein, 1986; Forbus, Ferguson & Gentner, 1990; Keane, 1990; Rohr & Reimann, 2000; Spiro, Feltovich, Coulson, & Anderson, 1989).

3.3.2.4 Die Untersuchung von Hollstein (2001)

Hollstein (2001) stellte in seiner Dissertation Untersuchungen zum Erlernen des Teilchenmodells vor, die mit einer Lernumgebung durchgeführt wurde, die aus dem Forschungsstrang hervorging, der im Laufe der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Er benutzte eine Unterrichtseinheit, in der nach einer Einführungsstunde in den Modellbegriff mithilfe einer Black Box Phänomene der Gasdifffusion, der Brownschen Bewegung, der Aggregatzustände mithilfe des Simulationsprogramms L.E.S.P interpretiert wurden und zum Schluss eine Stunde über atomare Größendimensionen eingeschoben wurde. Die erste Studie von Hollstein wurde mit einer 7. und einer 9. Klasse eines Gymnasiums durchgeführt. Der Lernerfolg wurde überprüft mit einem Prä-Posttest-Design kombiniert mit Logfile-Analysen, gefolgt von einem Langzeittest etwa 4 Monate später. Benutzt wurden für die Tests Papier- und Bleistift Aufgaben (s.a. Hollstein, 2001). Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Lernerfolg der Lerneinheit, wobei sich im Langzeittest kein Abfall gegenüber den Ergebnissen des

Posttests zeigte. In einer zweiten Studie verglich Hollstein eine Gruppe, die mit selbst konstruierten Simulationen lernte mit einer anderen Gruppe, die mit reinen Präsentationen der Simulation lernte. Hier zeigte sich, dass die aktive Konstruktion einer Simulation zu einem deutlich besseren Lernerfolg führte.

Die Untersuchungen von Hollstein sind für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, weil sie mit einem fast identischen Konstruktionsprogramm durchgeführt wurden. Hollstein macht eher allgemeine positive Aussagen über den Lerneffekt der Simulationsbenutzung und kann keine Mikroanalyse der Lernprozesse durchführen, weil Test- und Lernaufgaben für diesen Zweck nicht aufeinander abgestimmt waren. Eine genauere Analyse der individuellen Lernprozesse bleibt Aufgabe dieser Arbeit.

3.3.2.5 Andere Ansätze

Williamson & Abraham (1995) untersuchten den Effekt von Animationen beim Unterricht über das Teilchenmodell in einer Studie, in der Animationen einerseits zur Unterstützung des lehrerzentrierten Unterrichts einer großen Gruppe von College Studierenden und andererseits zur Unterstützung des Unterrichts über das Teilchenmodell gekoppelt mit individuellen Lernaufgaben unter Benutzung der Simulation eingesetzt wurden. Verglichen mit einer Kontrollgruppe, die ohne Animation lernte, lernten die Studierenden der Experimentalgruppen mehr.

Kurz erwähnt werden sollen historisch orientierte Lernansätze (z.B. Genseberger, 1986, 1987). Bei ihnen sehe ich aus lernpsychologischer Sicht das generelle Problem, dass der historische kognitive Kontext der Entdecker naturwissenschaftlicher Phänomene sich von der Unterrichtssituation etwa 14-jähriger Schülerinnen vor allem durch seine viel größere Komplexität stark unterscheidet und dass deshalb historische Zugänge für den Gebrauch im Unterricht oft stark vereinfacht werden müssen. Wie komplex diese Kontexte wahrscheinlich waren und wie sehr sie sich vom kognitiven Status heutiger Schülerinnen unterscheiden, zeigen z.B. die kognitiven Analysen der Entdeckungen von Lavoisier (Thagard, 1989) oder Kepler (Gentner, Brem, Ferguson, Markman, Levidow, Wolff & Forbus, 1997).

Insgesamt weisen diese exemplarisch ausgesuchten Studien aus der Perspektive der vorliegenden Fragestellung immer wieder darauf hin, dass vor allem die Übertragungsprozesse bei der Bildung des mentalen Teilchenmodells in ihren Details untersucht werden sollten, um die psychologische Plausibilität der verschiedenen Ansätze diesbezüglich vergleichen und bewerten zu können.

3.3.3 Die Bedeutung des Lernens über Modelle für den Erwerb des mentalen Teilchenmodells

Weil das Lernen des Metawissens über Modelle das zentrale Thema des Ansatzes von Mikelskis-Seifert (2002) ist, die Thematik bei Buck u.a. (2004) anklingt und sie auch in für diese Arbeit eine wichtige Rolle spielen, wird dieser Punkt in diesem Abschnitt diskutiert. Dass Metawissen über Modelle beim Erlernen des Teilchenmodells zu „besseren“ Ergebnissen führt, zeigen Arbeiten von Peuckert (z.B. Peuckert & Fischler, 1999).

Der systemorientierte Ansatz von Buck problematisiert wegen seiner zugrunde liegenden phänomenologischen Ausrichtung den Begriff des Modells selbst nicht. Wird er mit dem begrifflichen Instrumentarium des Ansatzes dieser Arbeit gesehen, so benutzt Buck (z.B. 2004) allerdings analoge Übertragungen, um die Überlegungen zu Gemeinsamkeiten und Nicht-Gemeinsamkeiten zwischen System und Systembestandteilen von bekannten Bereichen auf das Teilchenmodell zu übertragen. Aus dem Blickwinkel eines erkenntnistheoretischen interpretativen Realismus, für den der Modellbegriff eine zentrale Rolle spielen kann, unterstützt der systemorientierte Ansatz von Buck damit die reflektierte Bildung von Modellrelationen, weil die Beziehungen von System und Systemteilen im Ansatz dieser Arbeit als Modellrelationen bezeichnet werden. Allerdings wird im Ansatz von Buck natürlich nicht über die Eigenschaften von Modell als solchen reflektiert, weil der Begriff des Modells eher in den erkenntnistheoretischen Spielarten des (kritischen, hypothetischen, interpretativen...) Realismus eine bedeutende Rolle spielt.

Mikelskis-Seifert (2002, 2003) begründet eine solche Position des hypothetischen Realismus für ihren Unterrichtsansatz zum Lernen über Modelle auch mit dem Argument, dass Schülerinnen und Schüler meist die erkenntnistheoretische Position eines naiven Realismus einnehmen, aus dem heraus sie leichter den motivierenden Nutzen von Teilchenmodellen (als Teil ihrer Realität) erkennen. Umgekehrt sei aus erkenntnistheoretisch idealistischen Positionen (z.B. konstruktivistische oder pragmatische) Schülerinnen und Schüler der Nutzen von Teilchenmodellen nur mit größeren Schwierigkeiten einsichtig zu machen. Für den Unterricht schlägt Mikelskis-Seifert einen Workshop-Ansatz vor, in dem Lehrende eine Lernumgebung zur Verfügung stellen, in der sie die Lernenden hin zum selbstständigen Entwickeln von Ideen führen. Ihr nach mehreren Ebenen der Modellbeschreibung strukturiertes Arbeitsmaterial soll im Kontext des Workshopansatzes die Ausbildung von Modellwissen unterstützen. Aus der Perspektive der vorliegenden Arbeit ist der Ansatz von Mikelskis-Seifert deshalb interessant, weil durch den (beispielsweise analogiebasierten) Vergleich der verschiedenen Modelldarstellungen eines Phänomens ihre Gemeinsamkeiten für den Aufbau kritisch reflektierter Teilchenmodelle und zusätzlich für den Aufbau eines mentalen Modells von Modellen selbst benutzt werden können. Die individuellen kognitiven Prozesse beim Arbeiten mit den verschiedenen Modellebenen müssen noch geklärt werden: Es bleibt daher unklar, inwieweit z.B. die in dieser Arbeit postulierten analogiebasierten Lernprozesse in der Lage sind, gleichzeitig das inhaltliche makroskopische und submikroskopische Wissen (mitsamt der Modellrelationen) als auch gleichzeitig in schemabildenden Prozessen das Wissen über Modelle zu generieren, ohne die Schülerinnen und Schüler zu überfordern. Zwar weisen einige der empirischen Ergebnisse von Mikelskis-Seifert darauf hin, dass ihr Ansatz dies leisten kann, allerdings muss z.B. ihre positive Wertung der Ergebnisse des LISREL-Verfahrens kritisch überprüft werden, da sie beispielsweise keine alternativ möglichen Kausalmodelle ihrer Daten diskutiert (s.a. Bortz, 1999).

Vollebregt (1998) vernachlässigt das explizite Lernen über Modelle mit dem Argument, dass die Lernenden im Anfangsstadium damit überfordert werden. Stattdessen stellt sie nach der Einführung eines ersten einfachen Modells seine Verfeinerung in den Vordergrund. Vollebregt setzt eher darauf, dass die Lernenden dadurch Wissen über Modelle erwerben, dass sie eigenständig Ideen über die Zusammenhänge zwischen Modell und Phänomen entwickeln können.

Für die vorliegende Arbeit wird das Lernen über Modelle schon aus forschungspragmatischen Gründen zurückgestellt, da zunächst die Lernprozesse beim Erwerb des makroskopischen und submikroskopischen Wissens und der entsprechenden Modellrelationen geklärt werden sollen, bevor diese Frage auf der kognitionspsychologischen Ebene bearbeitet wird. Allerdings lässt sich auch aus kognitionspsychologischer Sicht vermuten, dass das Lernen über Modelle als Lernen auf einer Metaebene erst dann bedeutungsvoll werden kann, wenn die Lernenden schon auf der eigentlichen Inhaltsebene des Teilchenmodells ein erstes und ausreichend reichhaltiges Wissen erworben haben, z.B. deklaratives und prozedurales Wissen über und zum Umgang mit den verschiedenen Ebenen von Mikelskis-Seifert (2002). Solche Fragen des Verhältnisses von Lernen der Inhalte auf einer „niedrigeren“ Ebene und Lernen des darauf aufbauenden abstrakten Wissens über Modelle stehen also zunächst nicht im Zentrum dieser Arbeit. Allerdings zeigt sich bei der kognitiven Simulation der empirischen Ergebnisse einer Studie zum Erwerb

3.4 Wichtige Ergebnisse der Kognitionswissenschaft

3.4.1 Grundlegende Annahmen der Kognitionswissenschaft

Der folgende Abschnitt führt stark gekürzt die wesentlichsten Grundlagen der Kognitionswissenschaft auf und stützt sich dabei vor allem auf die Arbeit von Thagard (1996).

3.4.1.1 Entstehung, zentrale Arbeitshypothese und ihre Annahmen

Das Hauptziel der Kognitionswissenschaften ist es, eine Erklärung für die Bewerkstelligung intelligenten Verhaltens zu finden (Thagard, 1996, S.13).

Als Entstehungsjahr der Kognitionswissenschaft wird oft (z.B. Thagard, 1996; Wallach, 1998) das Jahr 1956 genannt, in dem die Dartmouth-Konferenz stattfand, Miller (1956) zeigte, dass die Kapazität des menschlichen Kurzzeitgedächtnisses auf etwa 7 Elemente beschränkt ist, Chomsky einen Vortrag über die Grundlagen der Transformationsgrammatik hielt und Bruner, Goodnow & Austin (1956) ein Buch über den Konzepterwerb veröffentlichten (Wallach, 1998). An der Dartmouth-Konferenz nahmen Wissenschaftler aus den Disziplinen Linguistik, Kognitive Psychologie und Künstliche Intelligenz teil. Im Untertitel der wichtigsten, in den siebziger Jahren gegründeten kognitionswissenschaftlichen Publikation, dem Journal „Cognitive Science“: „A multi-disciplinary journal of anthropology, artificial intelligence, education, linguistics, neuroscience, philosophy, psychology“ wird deutlich, dass das interdisziplinäre Feld der Kognitionswissenschaft seit 1956 deutlich breiter geworden ist.

Die zentrale Annahme der Kognitionswissenschaft lautet nach Thagard (1996): „Denken kann am besten im Sinne von repräsentationalen geistigen Strukturen und computationalen Verfahren, die auf diesen Strukturen operieren, verstanden werden“.

Mit der Entwicklung der Computer ergab sich eine Analogie zwischen der Arbeitsweise von Computern und mentalen Prozessen, die sich in Grenzen als fruchtbar erwiesen hat: Den Datenstrukturen und Algorithmen, die auf dem Computer lauffähige Programme bilden, entsprechen analog beim Menschen Mentale Repräsentationen und computationale Prozesse, die menschliche Informationsverarbeitungsprozesse ermöglichen.

Die zentrale Annahme kognitiver Theorien ist also, dass sie von einem Satz von Repräsentationsstrukturen und einem Satz von Verfahren ausgehen, die auf diesen Strukturen operieren. Computermodelle dieser Strukturen und Prozesse sollen dazu dienen, die mentalen Prozesse durch den Vergleich mit den präzise und explizit formulierten Modellen auszuarbeiten, zu überprüfen und zu korrigieren.

Nach Thagard (1996, S.35) ist dieser zentrale Ansatz der Kognitionswissenschaft unvollständig: Neurowissenschaftliche Erkenntnisse, emotionale und soziale Aspekte des Denkens und Wissens erfordern substanzielle Erweiterungen, die in den letzten Jahren in diesen Richtungen auch zunehmend geleistet werden. Dennoch hilft die zentrale Annahme der Kognitionswissenschaft entscheidend, die kognitive Komponente auch von schulischen Lernprozessen im Bereich des Teilchenmodells zu klären und damit z.B. die notwendige kognitive Lernbarkeitsvoraussetzung zu klären für abstraktere Diskussionen von beispielsweise Lernzielen, sozialer Unterrichtsorganisation, schulischer Lernumgebung, Elterneinfluss, Motivation und Emotion.

3.4.1.2 Methodologie

Wallach (1998) gab für die kognitionswissenschaftliche Vorgehensweise vier Schritte an.

1. Aufgabenanalytische Untersuchung des Gegenstandsbereichs
2. Durchführung empirischer Untersuchungen
3. Modellimplementierung
4. Geltungsprüfung der Modellierung

Die strenge Abfolge wird allerdings fast nie eingehalten, weil die starken Wechselwirkungen zwischen diesen Aufgabenbereichen immer wieder Rücksprünge notwendig machen und z.B. eine spiralförmige Weiterentwicklung einer Modellierung sinnvoll erscheint.

Aufgabenanalyse

Bevor ein Lernprozess wie der Erwerb des Teilchenmodells durch Schülerinnen und Schüler in der Sekundarstufe I genau untersucht werden kann, muss der fachliche Inhalt der Lernaufgabe genau analysiert werden. Es muss also eine genaue Darstellung des Wissens formuliert werden,

dass die Lernenden mit ihrem Vorwissen und kognitiven Lernprozeduren erwerben sollen. Im Falle des Teilchenmodells der Gase ergibt sich für jüngere Lernende das Problem, dass die herkömmlichen quantitativen Darstellungen der Lernaufgaben in Form von algebraischen Gleichungen (z.B. makroskopische Gasgesetze, entsprechende Gleichungen für das mechanische Verhalten submikroskopischer Teilchen) keine für die Lernenden adäquate Darstellung der Lerninhalte ermöglichen und deshalb die Aufgabenanalyse letztlich zu einer Darstellung der Lerninhalte führen muss, die den Formulierungen der qualitativen Physik entsprechen, die oben vorgestellt wurde.

Empirische Untersuchungen

Die empirische Adäquatheit eines kognitionswissenschaftlichen Modells ist nach Wallach (1998, S.47) ein zentrales Bewährungskriterium. Bei der empirischen Untersuchung mentaler Leistungen stellt sich das Problem, dass die empirischen Untersuchungsmethoden grob sind, verglichen mit dem Spezifikationsgrad, den ablauffähige Computermodelle kognitiver Leistungen erfordern. Die Eigenschaften von Computermodellen sind deshalb praktisch immer empirisch unterbestimmt. Hermann (1990, zitiert in Wallach, 1998) schreibt zum Verhältnis von kognitiver Modellierung und Empirie:

„Wir können dem kognitiven Modellierer kein elaboriertes und differenziertes Original vorgeben, das er in seinem Software-Modell rekonstruieren könnte. Wir können ihm allerdings einige Constraints vorgeben, die er bei einer versuchten naturgetreuen Modellierung beachten muss... Jede naturgetreue Modellierung des menschlichen Operierens, die die *notwendigen* Bedingungen psychischer Leistungen anzielt, muss diese Constraints berücksichtigen... Wie zum Beispiel sollte man ohne das Experimentieren zu den Constraints kommen?“

Ob in der Empirie einzelfallanalytisch, klassisch experimentell (bzw. quasi-experimentell) bedingungsvariierend oder mit anderen nicht-experimentellen Methoden vorgegangen wird, hängt vom Modelltyp der kognitiven Modellierung ab.

Opwis & Spada (1994) unterscheiden 3 Modelltypen:

- Idiografische Modelle, die die kognitive Struktur eines ausgewählten Individuums modellieren (und deshalb immer Fragen nach ihrer Generalisierbarkeit aufwerfen). Für idiografische Modelle werden vorwiegend empirische Einzelfalluntersuchungen durchgeführt.
- Prototypische Modelle, durch die ein für eine Population als allgemeingültig postuliertes Modell gefunden werden soll. Dabei wird von Besonderheiten des Einzelfalls abstrahiert und auf für eine Population gemeinsame Merkmale der kognitiven Struktur gezielt. Typischerweise wird in der empirischen Arbeit mit experimentellen Designs gearbeitet.
- Individualisierte Modelle, bei denen zwar ein prototypisches Modell erarbeitet wird, dieses aber noch auf die Einzelfälle speziell angepasst wird. Typischerweise wird in dieser aufwendigen Verfahrensweise empirisch mit einer Kombination von Einzelfallanalysen und experimentellem Design gearbeitet.

Implementierung des kognitiven Modells

Genau und umfassende Anleitungen zur Implementierung einer kognitiven Simulation lassen sich laut Wallach (1996) und Opwis & Plötzner (1996) nicht geben.

Um auf der Grundlage der empirischen Daten eine Implementierung eines Modells vorzunehmen, muss zunächst festgelegt werden, auf welche der erhobenen Daten sich das Modell bezieht. Hier stellt sich z.B. die Frage, welche Lernmechanismen angenommen werden, ob und gegebenenfalls welche Architektur des kognitiven Systems angenommen wird, wie viele der Datendetails sinnvoll modelliert werden sollen, wie weit Begrenzungen der menschlichen Informationsverarbeitungskapazität simuliert werden sollen, usw.

Nach der Festlegung dieser Merkmale werden die ausgewählten Abbildungsmerkmale in ein entsprechendes Computerprogramm enkodiert.

Überprüfung der Adäquatheit des implementierten Modells

Wallach (1998) unterscheidet zwei Prüfungen der Angemessenheit eines kognitiven Modells: eine empirische und eine theoretische Überprüfung.

Die theoretische Adäquatheit kann nach einem Vorschlag von VanLehn, Brown & Greeno (1984) in einer modellvergleichenden Analyse überprüft werden. Dazu werden verschiedene kognitive Modellierungen eines Gegenstandsbereich bezüglich ihrer zentralen Annahmen, Strukturen und Mechanismen offen gelegt und verglichen.

Einschränkend gilt für die empirische Überprüfung kognitiver Modelle als hypothetischer Konstrukte, dass für eine Menge empirischer Beobachtungsdaten zur Überprüfung eines bestimmten Modells immer ein anderes Modell gefunden werden kann. Dieses prinzipielle Problem gilt für eine Vielzahl von Beziehungen zwischen empirischen Daten und theoretischen Bereichen (z.B., wenn theoretische Modelle empirisch untersucht werden, die aus hypothetischen Konstrukten bestehen), hindert jedoch nicht daran, im Laufe der Forschung zunehmend mehr theoretische Modelle als empirisch inadäquat auszuschließen (Wallach, 1998, S.53).

Die empirische Prüfung eines kognitiven Modells besteht zunächst aus der Prüfung seiner Suffizienz (Opwis & Spada, 1994; Wallach, 1998). Suffizienz bedeutet, dass das kognitive Modell in der Lage ist, die untersuchten kognitiven Leistungen zu generieren. Wallach erwähnt dazu folgende Unterkriterien:

- Produktkorrespondenz. Eine Modellierung ist nach diesem Kriterium suffizient, wenn sie bezüglich einer Aufgabe die Endprodukte (z.B. Aufgabenlösungen) generieren kann.
- Korrespondenz von Zwischenschritten: Dieses Suffizienzkriterium hebt nicht auf die Endprodukte, sondern auf die Übereinstimmung der Zwischenschritte bei der Generierung der Endprodukte ab.
- Temporale Korrespondenz: Sie ist gegeben, wenn Latenzzeiten z.B. bei der Generierung von Zwischenschritten oder verschiedenen Endprodukten zwischen Modellierung und Versuchspersonenverhalten übereinstimmen.
- Lernkorrespondenz: Dieses Kriterium berücksichtigt die Übereinstimmung des Wissenserwerbs zwischen Modell und Versuchspersonen.

Das meistgebrauchte Korrespondenzkriterium ist die Produktkorrespondenz. Werden weitere Kriterien untersucht, spricht man von konvergenter Validierung (Wallach, 1998, S.56). Die einzelnen Korrespondenzkriterien müssen soweit operationalisiert werden, dass Modellverhalten und empirische Daten in einem festgelegten Verfahren miteinander verglichen werden können.

Das Design der empirischen Verfahren zur Überprüfung der Korrespondenzkriterien kann wieder unterschiedlich sein: Es können statistische Untersuchung zur Übereinstimmung vorher bestimmten Oberflächenverhaltens gemacht werden (z.B. kann eine Simulation, die das Benutzerverhalten beim Arbeiten mit einer Software simuliert, bezüglich der Häufigkeit bestimmter Programmaufrufe mit dem tatsächlichen Benutzerverhalten statistisch verglichen werden). Zur strengeren Überprüfung können aus dem Verhalten der Simulation unter verschiedenen Bedingungen aber auch Vorhersagen abgeleitet werden, die dann streng experimentell überprüft werden. Und drittens können zur Überprüfung idiografischer (bzw. individueller) Modellierung Vergleiche zwischen dem zeitlichen Ablauf einer Simulation (sog. trace bezüglich ausgewählter Merkmale) und dem Protokoll des Versuchspersonenverhaltens bei der entsprechenden kognitiven Aufgabe getroffen werden.

Außer dass ein Modell suffizient ist, sollte es für seine empirische Adäquatheit außerdem Daten nicht reproduzieren, die empirisch nicht beobachtbar sind (Wallach, 1998, S.56). Das bedeutet für eine Simulation der Erwerbsprozesse der Teilchenmodells, dass das kognitive Modell keine „Äußerungen“ hervorbringen sollte, die die simulierte Versuchsperson in ihren Äußerungen nicht produziert hat.

3.4.2 Modelle zum Erlernen des Teilchenmodells durch den Gebrauch von Analogie

Lernen durch Analogien stellt eine wichtige Form des induktiven Lernens dar, bei dem bekanntlich von einem Wissensbeispiel auf andere Fälle, bzw. auf allgemeingültige Strukturen generalisiert wird. Bei der Analogie werden in einem oder mehreren Schritten Wissensselemente zweier Wissensstrukturen, Analogiequellbereich und Analogiezielbereich, miteinander verbunden. Dadurch werden Wissensübertragungen zwischen den beiden Bereichen möglich (in einigen Theorien auch in beiden Richtungen).

3.4.2.1 Modelle aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz

In den 80er Jahren wurden eine Reihe von Ansätzen zum Lernen und Denken mit Analogien im Bereich der Künstlichen Intelligenz entwickelt, deren Bedeutung für den Erwerb des Teilchenmodells eher gering ist, sodass sie hier nur erwähnt werden: Die Modelle z.B. von Winston (1980) Carbonell (1986) behandelten das Denken und Lernen mit komplexeren Analogien und führten zu einer allgemeineren Betrachtungsweise, aus der sich das fallbasierte Paradigma (Kolodner, 1993) entwickelte, das unten noch einmal erwähnt wird.

3.4.2.2 Syntaktische Analogiebildung: Structure Mapping Theory und Structure Mapping Engine

Gentner (z.B. 1983) hat mit der Structure Mapping Theory (SMT) ein mentales Analogiemodell publiziert, das auf der symbolischen Ebene arbeitet. Mit der Structure Mapping Engine (SME, Falkenhainer, Forbus & Gentner 1989) wurde eine ablauffähige Computersimulation für den Teilprozess des Mappings zwischen zwei Wissensstrukturen veröffentlicht. Die SMT ist in den letzten Jahren auch in der Fachdidaktik der Chemie und Physik benutzt worden (z.B. Kleine 1997; Paatz, 2001). Gentner geht in ihrem SMT-Modell von der symbolischen Wissensebene aus: Das Wissen der beiden Wissensbereiche wird in Form von Propositionen dargestellt. Folgende beiden Abbildungen (aus Falkenhainer u.a. (1989) verdeutlichen die Bildung einer propositionalen Darstellung einer physikalischen Analogie:

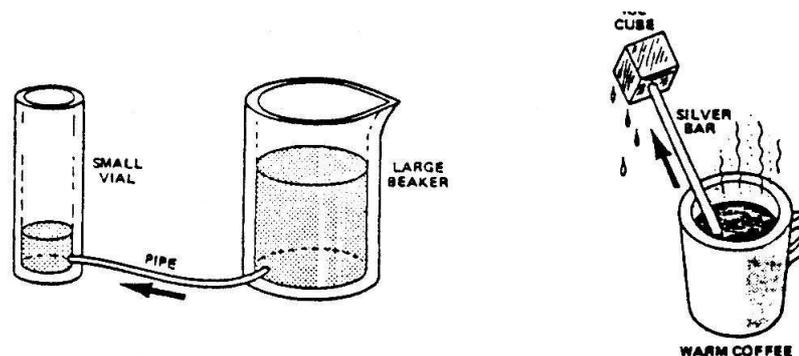


Abbildung 3.7: Analogie zwischen dem Flüssigkeitsaustausch in kommunizierenden Röhren und dem Wärmeaustausch zwischen einem Eisblock und einer heissen Tasse Kaffee.

Eine Proposition ist hier zum Beispiel:

CAUSE(GREATER-THAN(X,Y), BREAK(Y)).

Die Hauptrelation ist hier CAUSE, ihre Argumente sind wiederum Propositionen, GREATER-THAN(X,Y) und BREAK(X,Y).

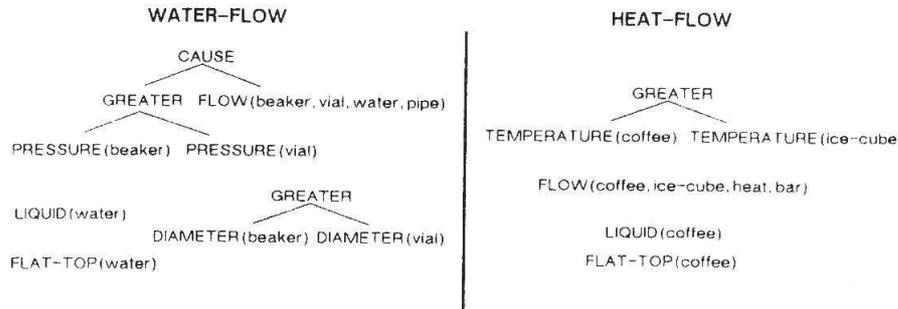


Abbildung 3.8: Propositionale Darstellung der Analogie zwischen Flüssigkeits- und Wärmeaustausch

Propositionen werden in der Structure Mapping Theory bzw. ihrer Umsetzung in ein lauffähiges Programm, die Structure Mapping Engine, in eine Ordnung nach ihrer Systematizität (nicht zu verwechseln mit den Ordnungen der formalen Logik) gebracht: Objekte und Konstanten haben die Ordnung 0, die Ordnung eines Prädikats ist 1 plus der maximalen Ordnung seiner Argumente. Bei der Bildung einer analogen Beziehung werden Analogien zwischen Relationen der beiden Wissensbereiche mit höherer Systematizität bevorzugt.

Gentner nimmt in der SMT drei Stufen bei der Auswahl, Bildung und Verwendung einer Analogie an:

- Access: Eine Person ist in dieser Situation mit einem ihr unbekanntem Zielbereich (Wissensbereich im Arbeitsgedächtnis) konfrontiert, durchsucht ihr Gedächtnis nach einem sinnvollen Analogbereich (Rückgriff auf Altwissen im Langzeitgedächtnis) und wählt ihn für die Analogiebildung aus.
- Mapping: Ist ein Analogbereich gefunden, beginnt das Mapping, die Zuordnung der Objekte von Analog- und Zielbereich. In der SMT (SME) kommt den Relationen entscheidende Bedeutung zu, Objekte und Konstanten spielen beim Mapping keine zentrale Rolle. Die SMT, bzw. SME postuliert für das Mapping folgende Schritte:
 - Erstellen der Objekt-Korrespondenzen der beiden Bereiche.
 - Vernachlässigen der Objektattribute
 - Erstellen der Menge der Relationskorrespondenzen.
 - Beachten der Systematizität der Relationen (Vernachlässigen isolierter Relationen).

Von vielen zur Auswahl stehenden Prädikaten werden also diejenigen, die aus einem kohärenten System verknüpfter Relationen bestehen, bevorzugt (Gentner und Clement 1988). Das Mapping muss zu eindeutigen Resultaten führen, d.h., die Zuordnungen müssen in beiden Richtungen möglich sein.

- Evaluation und Nutzung: Als Kriterien der Evaluation des gebildeten Mappings fungieren strukturelle Kriterien (Anzahl der Ähnlichkeiten und Differenzen, Ordnung der strukturellen Ähnlichkeit, Menge und Art des neuen verfügbaren Wissens), Validität und Relevanz des Mappings.

Empirische Studien belegen, dass nützliche Analogien, z.B. im Bereich der Wissenschaft (Gentner, 1982) oder der Erziehung (Gentner und Toupin, 1986), umfangreiche, stark vernetzte Abbildungssysteme zwischen zwei Bereichen beinhalten und nicht eine Menge unabhängiger Korrespondenzen beinhalten. Neben der eigentlichen Analogie, bei das Mapping zwischen den Wissensstrukturen

durch die Eigenschaften der Relationen bestimmt wird, unterscheiden Falkenhainer u.a. (1989) weitere Analogietypen, die allerdings alle eindeutige, strukturell konsistente Mappings liefern:

- **Wortwörtliche Ähnlichkeit:** Um einen wortwörtlichen Vergleich handelt es sich dann, wenn sowohl Objektattribute als auch Relationen abgebildet werden. Ein Beispiel wäre: „Das Sternensystem X12 im Andromeda-Nebel ist wie unser Sonnensystem“. Eine relationale Übereinstimmung ist, dass der Stern X12 wie die Sonne in unserem Sonnensystem von Planeten umkreist wird. Eine Übereinstimmung im Bereich der Attribute würde beim wortwörtlichen Vergleich implizieren, dass X12 ähnliche Eigenschaften wie die Sonne hat, z.B. von mittlerer Größe ist und gelbes Licht aussendet. Typischerweise spielen wortwörtliche Ähnlichkeiten eine Rolle bei Analogien innerhalb einer Wissensdomäne, also z.B., wenn im Bereich der Chemie Analogien zwischen optischen Isomeren eines Stoffs gebildet werden.
- **Abstraktion:** Die Abstraktion stellt einen Spezialfall der Analogie dar. Im Analogbereich liegt hierbei eine abstrakte relationale Struktur mit allgemeinen, abstrakten Beschreibungsformen (z.B. Variablen) vor, die auf den Zielbereich übertragen werden. Dieser Spezialfall einer Analogie hat für das Gebrauchen eines erlernten Teilchenmodells Bedeutung, da die Anwendung der wissenschaftlichen Teilchenvorstellung auf einen konkreten Stoff als Mapping eines abstrakten Modells auf einen konkreten Fall betrachtet werden kann, bei dem nach den Regeln des analogen Mapping vorgegangen wird.
- **Oberflächliche Übereinstimmung:** Werden nur wenige oder gar keine Relationen, dafür aber viele Attribute vom Analogbereich in den Zielbereich abgebildet, spricht man von einer oberflächlichen Übereinstimmung, die lediglich auf einer Ähnlichkeit des reinen Erscheinungsbildes beruht. Der Erklärungswert eines solchen Vergleichs auf Grund der fehlenden relationalen Übereinstimmungen zwischen den Bereichen ist begrenzt. Ein Beispiel wäre: „Ein kleinstes Teilchen ist wie ein Baby“.
- **Anomalie:** Im Falle der Anomalie werden wenige oder gar keine Prädikate vom Analogbereich in den Zielbereich übertragen. Somit entstehen fragwürdige Analogien wie „Ein kleinstes Teilchen ist wie ein Teller Schichtkäse“, weil zwischen dem Quell- und dem Zielbereich der Analogie kaum mehr Analogierelationen bestehen.

Diese weiteren Analogietypen haben für diese Arbeit eine besondere Bedeutung, weil sie die Anwendung analogen Denkens z.B. auf die Beziehung von theoretischem Modell und Anwendungsbeispiel, aber auch auf „fehlerhafte“ Analogien verschiedener Art zulassen.

3.4.2.3 Das Kohärenz-Modell der Analogie von Thagard und Holyoak

Die Arbeitsgruppen um Holyoak und Thagard (Holyoak & Thagard 1989; Thagard, 1989; Thagard, Holyoak, Nelson & Gochfield, 1989) haben mit den Modellen zum Abruf von analogen Strukturen aus dem Langzeitgedächtnis (Analogical Retrieval by Constraint Satisfaction und das entsprechende Simulationsprogramm, ARCS), zum Prozess der Analogiebildung selbst zwischen einer Quell- und einer Zielstruktur (Analogical Mapping by Constraint Satisfaction bzw. das ablauffähige Simulationsprogramm Analogical Constraint Mapping Engine, ACME) und zur Erklärung durch Kohärenz (Explanatory Coherence mit dem entsprechenden Simulationsprogramm ECHO) drei Modelle vorgelegt, die die Anwendung von Analogien zur Anreicherung des Wissens und die geänderte Auswahl von Lösungswegen nach einem Wissenszuwachs durch Analogielernen modellieren können. Im Folgenden wird von ARCS, dem Modell des Analogical Retrieval (also der Auswahl einer unter mehreren möglichen Analogien), abgesehen; die Konzentration liegt auf analogem Mapping und Aufgabenbeantwortung, erfasst durch ACME und ECHO. Holyoak und Thagard versuchen mit ihren Modellen die Stärken sowohl der symbolischen, als auch der konnektionistischen Ansätze in einem hybriden Ansatz zu nutzen, um Kognitionen abbilden zu können, indem sie symbolische Repräsentationen expliziten Wissens mit konnektionistischen Prozessen verbinden, die eine größere neurobiologische Plausibilität als rein symbolorientierte Ansätze beanspruchen

können. Sie gehen von der Annahme aus, dass beim Gebrauch von Analogien immer dieselben Abbildungsmechanismen angewandt werden. Das heißt, wenn ACME eine Implementation dieses allgemeinen Abbildungsmechanismus ist, dann sollte es auch in den verschiedenen Bereichen der Anwendung von Analogien - wie Problemlösen, Argumentieren, Erklären - erfolgreich analoge Abbildungen aufzeigen können. Allgemein arbeiten solche strukturellen Modelle auf der Wissensebene parallel, d.h., es können gleichzeitig mehrere Problemlösewege oder Wege für Inferenzen verfolgt werden. Diese parallele Verarbeitung ermöglicht es, dass sich kompatible Lösungen und Hypothesen gegenseitig unterstützen und verstärken, während sich inkompatible Hypothesen gegenseitig zu hemmen versuchen. Tritt ein neuer Interpretationskontext auf, so liefert dieser mehr Evidenz für die Aktivierung bisher weniger aktiver Knoten, die damit gegen die bisher aktivierten Knoten gewinnen können.

Die Analogiebildung von ACME benutzt semantische (semantische Ähnlichkeit), syntaktische und pragmatische (Zwecke der Analogiebildung) Bedingungen (constraints), um Ziel- und Quellbereich zu mappen. Ein wichtiger Unterschied aller drei Verfahren (zum Beispiel zur SME) liegt darin, dass im konnektionistischen Constraint-Satisfaction-Modell keine harten alles-oder-nichts Entscheidungen über alternative Lösungen getroffen werden (wie bei der SME), sondern dass z.B. in ACME die Bedingungen einen graduellen Einfluss nehmen, der umso stärker ist, je deutlicher die Kriterien semantischer Ähnlichkeit, syntaktischer Übereinstimmung und Zielrelevanz eines möglichen Mappings erfüllt sind. Zum Schluss einer Analogiebildung kristallisiert sich die Analogie heraus, die den Kriterien am deutlichsten entspricht.

Die Arbeitsweise von ACME

ACME konstruiert aus den propositionalen Beschreibungen der Analoga bestimmten Regeln eine Menge von Analogiehypothesen. Das Mapping wird vorgenommen, indem für jedes Propositionspaar mit gleicher Anzahl von Argumenten (Objekte) Propositions-, Prädikaten-, und Objektpaare aus Ziel- und Analogstruktur in Hypothesenknoten („units“) des neuronalen Netzwerks abgebildet werden. Zwischen den Hypothesenknoten werden gemäß eines Satzes von festen Regeln Verbindungen („links“) gezogen, die entweder erregenden oder hemmenden Input an die durch sie verbundenen Hypothesenknoten transportieren.

Folgende sind die entscheidenden Verbindungsregeln:

- Erregende Verbindungen existieren zwischen den Propositions-, Prädikat-, und Objektunits, die die Analogiehypothese repräsentieren.
- Hemmende Verbindungen bestehen jeweils auf Propositions-, Prädikats- und Objektebene zwischen allen Knoten von Analogiehypothesen, die miteinander konkurrieren.
- Als letzter Konstruktionsschritt wird eine semantische und eine pragmatische Unit in das Netz eingebaut. Die semantische Unit sendet andauernd erregenden Input an alle Units mit semantisch ähnlichen Prädikaten, die pragmatischen Unit erregenden Input an alle Units, die aus pragmatischen Gründen hervorgehoben sind.
- Vor dem Start des Simulationslaufs wird allen Hypothesenknoten ein initialer Aktivierungswert zugewiesen. Dieser Wert steht für die initiale Plausibilität einer Hypothese und nimmt im Laufe des Simulationslaufs ab oder zu.

Jetzt kann der erste Zyklus des neuronalen Netzes gestartet werden. Für jede Unit wird berechnet, welchen erregenden oder hemmenden Output sie aufgrund ihrer aktuellen Aktivierung an mit ihr durch erregende oder hemmende Links verbundene Units sendet. Jede Unit setzt wiederum nach einem bestimmten Algorithmus die Summe des empfangenen erregenden und hemmenden Inputs in einen neuen Aktivationswert um. Sind nach diesem Schema die neuen Aktivationswerte aller Units bestimmt, startet nach dem gleichen Schema der nächste Netzwerkzyklus.

Das Hypothesenetzwerk wird zur Lösung gebracht, indem über die Verbindungen der Hypothesenknoten solange Aktivierungsenergie durch das Netz propagiert wird, bis ein stabiler Zustand

gemäß eines Abbruchkriteriums erfüllt ist. Dieser stabile Zustand bedeutet konkret, dass Aktivierungsveränderungen jedes Hypothesenknotens kleiner als eine vorgegebene Schranke sein muss. Danach lässt sich der Aktivierungsgrad für jeden Hypothesenknoten auswerten. Die stark positiv erregten Hypothesen (positive Evidenz) zeigen die analogen Propositionen, Prädikate und Objekte.

ECHO

Bei ECHO handelt es sich um einen konnektionistischen Ansatz, das aus mehreren möglichen Erklärungen für ein Explanans die kohärenteste bestimmt. Es ist ein lokalistisches bzw. hybrides konnektionistisches Modell, in dem einzelne Units Propositionen repräsentieren. Die Knoten werden wiederum nach einem Satz fester Regeln miteinander verbunden:

Im Folgenden werden wieder die wichtigsten Verbindungsregeln für den Aufbau des Netzes beschrieben.

Erregende Verbindungen bestehen:

- Wenn eine Proposition eine andere erklärt, wird zwischen den beiden entsprechenden Units eine erregende Verbindung eingerichtet.
- Wenn eine Proposition durch mehrere andere erklärt wird, bestehen erregende Verbindungen zwischen den Units des Explanandum und allen erklärenden Units, deren Verbindungsstärke umgekehrt proportional zur Anzahl der erklärenden Propositionen ist. Auf die gleiche Weise werden Verbindungen zwischen den erklärenden Units gebildet.
- Wenn zwei Paare von Explanans und Explanandum analoge Erklärungen bilden, dann werden die beiden Explanans-Units sowie die beiden Units, die das Explanandum repräsentieren, erregend miteinander verbunden.
- Zwischen einer speziellen Unit für Datenpriorität und allen Propositionen, die als evident gekennzeichnet sind. Die Units für die evidenten Propositionen werden in jedem Zyklus von der speziellen Unit positiv erregt.
- Hemmende Verbindungen werden eingerichtet,
- Wenn sich zwei Propositionen widersprechen.
- Bei einer unzulässigen Erklärungsanalogie zwischen den Units, die jeweils das Explanans repräsentieren. Eine unzulässige Erklärungsanalogie besteht dann, wenn bei zwei Paaren aus erklärender und erklärter Proposition zwar die erklärten Propositionen einander analog sind, nicht aber die erklärenden.

Die Gewichte der Verbindungen zwischen den Konzepten sind fest vorgegeben. Die Simulation läuft ähnlich wie in ACME ab. Es werden durch einen Prozess der Aktivierungsausbreitung die aktuellen Aktivierungen der einzelnen Konzeptknoten verändert. Wenn sich das Aktivierungsmuster der Units stabilisiert hat, kann die Untermenge der Units bestimmt werden, die eine kohärente Erklärung bilden, indem die Units jenseits einer kritischen positiven Aktivierung ausgewählt werden.

3.4.2.4 *Andere Modelle (Weiterentwicklungen des Modells von Thagard und Holyoak, Fallbasiertes Lernen)*

Da es in dieser Arbeit vorrangig darum geht, Analogielernen im Bereich des Anfängerunterrichts als eine plausible Lernform zu identifizieren und nicht darum, darüber hinausgehende Eigenschaften des Analogieprozesses zu untersuchen, wird das Analogiemodell von Thagard & Holyoak auf den Erwerb des Teilchenmodells angewendet. Mit seinen syntaktischen, semantischen und pragmatischen Eigenschaften reicht es dafür aus. Die Anwendung dieses Modells soll die Bildung von

Alltagskonzepten und des lehrplangemäßen Konzepts im Bereich des Teilchenmodells erklären können, den weiteren Weg bei der Differenzierung des Teilchenmodells aufzeigen können und daraus folgend didaktische Empfehlungen entwickeln helfen. Einige neuere Theorien des Denkens und Lernens mit Analogien werden im Folgenden kurz erwähnt, z.B. weil sie die weiteren Lernvorgänge beschreiben können, die nach der ersten mentalen Modellbildung erforderlich werden.

Keane's inkrementelles Analogiemodell

Keane's Modell der Incremental Analogy Machine (z.B. 1994) thematisiert einige Randbedingungen des analogen Schließens. Z.B. versucht es die für psychologische Anwendungen fragwürdige Berechnung aller denkbaren Mappings dadurch zu begrenzen, dass zunächst auf heuristischem Wege nur diejenigen ausgewählt werden, die wahrscheinlich gute Resultate erbringen. Damit geht dieses Modell über den eigentlichen Fokus dieser Arbeit hinaus: Im Rahmen der vorliegenden Studie wird in erster Linie betrachtet, ob das Lernen mit Analogie überhaupt in der Lage ist, die kognitiven Produkte hervor zu bringen, die beim Erwerb der Teilchenmodell empirisch beobachtbar sind, während weitere kognitive Randbedingungen, wie die von Keane betrachteten, zunächst nicht problematisiert werden.

Das Modell LISA von Hummel und Holyoak (1997)

LISA (Learning and Inferences with Schemas and Analogies) ist ein im Vergleich zu seinen Vorgängern neurobiologisch und psychologisch plausibleres, hybrides Modell. LISA zeichnet sich durch mehrere Besonderheiten aus:

- LISA repräsentiert Prädikate und Objekte als verteilte Aktivationsmuster von künstlichen neuronalen Units, die semantische Grundeinheiten repräsentieren.
- Die zur Bildung analoger Relationen nötigen Bindungen zwischen den dargestellten Strukturen werden durch zeitlich synchrones Schwingen der Aktivationen der Strukturen gebildet.
- LISA integriert den Access (Abruf) einer Quellanalogie in den Mapping-Prozess.
- Es beinhaltet Erweiterungsmöglichkeiten für Lernprozesse durch Schemainduktion nach Abschluss der Analogiebildung und analoge Inferenzen.
- Die Architektur von LISA impliziert wichtige Beschränkungen der menschlichen Informationsverarbeitung wie beispielsweise ein beschränktes Arbeitsgedächtnis.

LISA wurde so konstruiert, dass es propositionales Wissen sowohl dynamisch im Arbeitsspeicher als auch statisch im Langzeitspeicher repräsentieren kann. Mit diesen beiden Repräsentationen leistet es während Access und Mapping strukturierte Vergleiche in Form von geleiteten Mustervergleichen. Wenn eine Proposition aktiviert wird, erzeugen die Units, die sie im Langzeitgedächtnis repräsentieren, verteilte synchronisierte Aktivitätsmuster auf einer Anzahl von semantischen Units. Diese Muster, die als das Arbeitsgedächtnis des Modells fungieren, umfassen sowohl den semantischen Inhalt der Proposition als auch strukturelle Informationen (realisiert durch die dynamische Bindung durch zeitliche Synchronizität). Die semantischen Units stehen allen Propositionen des Langzeitgedächtnisses zur Verfügung, wodurch ein Muster von semantischen Units, das durch eine Proposition erzeugt wird, eine oder mehrere andere Propositionen anderer Analoge aktiviert werden können. Dieser Prozess ist eine Form des Gedächtniszugriffs.

Mapping wird durch einen verstärkten Prozess geleistet, der erlernt, welche Propositionen auf welche Muster antworten, also die Korrespondenz zwischen dem erregenden und dem antwortenden Muster. Diese Korrespondenzen werden als Verbindungsgewichte abgespeichert und dienen in nachfolgenden Zugriffen für die Eingrenzungen des Zugriffs. Über den Lauf mehrerer Propositionen ist das Resultat eine Repräsentation der Korrespondenzen zwischen den Elementen zweier oder mehrerer Analoge.

Für das Ziel dieser Arbeit, Lernen durch Analogien als entscheidenden Prozess beim initialen Teilchenmodellerwerb zu identifizieren, sind die verfeinerten Eigenschaften des Modells nicht nötig. LISA wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, stellt aber ein interessantes Modell für spätere Modellierungen im Bereich der Teilchenmodellerwerbs dar.

Fallbasierte Lernmodelle

Fallbasierte Lernmodelle (z.B. Kolodner, 1993; Reimann, 1997) gehen von komplexen Anwendungsbeispielen, den „Fällen“, als Gedächtnisrepräsentationen der Lerninhalte aus. Stößt eine Lernerin auf ein neues Problem, versucht sie die Lösungsinformationen des abgespeicherten Falls entweder direkt oder nach entsprechenden Anpassungen für das neue Problem zu nutzen. Damit sind fallbasierte Mechanismen für die ersten Bildungsprozesse des Teilchenmodells weniger geeignet, weil sie eher dafür konstruiert wurden, auf schon bekannte Lösungen innerhalb dieser Wissensdomäne zurückzugreifen („nahe Analogien“). „Ferne Analogien“, die für die Übertragung bekannter diskreter Systeme auf das neue Teilchenmodell gebraucht werden, werden besser durch Verfahren wie SME und ACME geliefert.

3.4.3 Stand der Forschung zum Lernen mit multiplen Repräsentationen

Beim Erwerb des Teilchenmodells mithilfe einer dynamischen Computersimulation spielen multiple Repräsentationen in zwei Dimensionen eine Rolle: erstens auf der Ebene verschiedener externer Repräsentationsformen (z.B. als Text, Bilder und bewegter, visueller Teilchenmodellsimulationen) und ihrer entsprechend unterschiedlichen internen Verarbeitung und zweitens auf der Ebene von qualitativer und quantitativer Darstellung der makroskopischen Phänomene und ihrer entsprechenden submikroskopischen Modelldarstellung.

3.4.3.1 Modelle zur Erklärung des Einflusses der kombinierten Präsentation von Text und Bildern auf den Lernprozess

In der Forschung zu multiplen Repräsentationsformen stand ursprünglich die Kombination von Text und Bild im Vordergrund, weil diese Kombination beispielsweise in Druckerzeugnissen am häufigsten auftrat. Ein zentrales Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass die Kombination von Text und Bildern zu besseren Lernresultaten führte als das Lernen mit einer externen Präsentationsform (Schnotz & Bannert, 2003). Erklärt wurden diese frühen Ergebnisse oft mit der dualen Kodierungstheorie von Paivio (z.B. 1986). Nach ihr werden verbale und bildliche Informationen getrennt voneinander in unterschiedlichen kognitiven Subsystemen verarbeitet. Der Vorteil von Präsentationsformen, in denen Text und Bilder kombiniert sind (z.B. Bilder in Lernbüchern) wird auf den Vorteil einer dualen Kodierung der Bilder im bildlichen analogen Subsystem und des Texts im anderen propositionalen Subsystem zurückgeführt. Eine doppelte Kodierung soll nach diesem Ansatz die Möglichkeit bieten, Lücken in der Repräsentation eines Subsystems mit der Information des anderen schließen zu können und generell durch Redundanz das Wissen besser abrufen zu können.

Die duale Kodierungstheorie konnte die vielen empirischen Ergebnisse, die gegen eine einfache positive Wirkung von multimedial dargebotenen Lerninhalten sprachen, nicht erklären. Um die große Komplexität dieses Feldes zu strukturieren, wurden (z.B. Schnotz & Lowe, 2003) drei verschiedene Ebenen formuliert, deren jeweils internen Fragen nicht mit denen der anderen Ebenen unkontrolliert vermischt werden dürfen. Zunächst spielt beim Lernen mit multimedial dargebotenen Inhalten die technische Ebene eine wichtige Rolle. Auf ihr geht es um die Technik, die die multimedialen Repräsentationen transportiert. Die zweite, semiotische Ebene bezieht sich auf die Eigenschaften des repräsentationalen Formats (also z.B. Text, Bilder, Animationen, auditive Information), und die dritte, sensorische Ebene auf die sensorische Modalität, also den Modus der menschlichen Wahrnehmung des jeweiligen Formats.

Mayer (z.B. 2001) erweiterte die duale Kodierungstheorie und betrachtete dabei vor allem die erste und die dritte Ebene. Er baute auf Paivios Theorie auf und nahm an, dass multimediale

Inhalte zunächst in zwei unterschiedlichen kognitiven Subsystemen - einem visuell-bildlichen und einem auditiv-verbale - zu spezifischen mentalen Modellen verarbeitet werden. Danach werden das text- und das bildbasierte eindeutig miteinander verknüpft. Mayer (2001) formulierte folgende praktischen Prinzipien für die Gestaltung des Lernens mit multimedial präsentierten Inhalten:

- **Multimedia-Prinzip:** Mit Text und Bildern kann insgesamt besser gelernt werden als nur aus Text alleine, weil die Lernenden Gelegenheiten haben, aus beiden Repräsentationsformen statt nur aus einer zu lernen. Dieses der Theorie von Paivio entsprechende Prinzip wurde in einer Mehrzahl von Studien der Arbeitsgruppe um Mayer bestätigt, allerdings gab es auch entgegengesetzte Resultate (für die Reihe von entsprechenden empirischen Untersuchungen der Arbeitsgruppe s. Mayer, 2001, S.74). Die Metastudie von Levie & Lentz (1982) zeigte das Prinzip von Mayer differenzierend, dass Bilder zu Texten lernunterstützend wirken, wenn sie text-redundante Informationen beinhalten. Das relativ einfache Multimedia-Prinzip wird durch die folgenden Prinzipien differenziert.
- **Prinzip der räumlichen Kontingenz:** Es wird besser aus multimedialen Repräsentationen gelernt, wenn Bilder und Worte auf einer Seite eng beieinander stehen, als wenn sie weiter voneinander entfernt stehen, weil in einer solchen Situation keine kognitive Ressourcen für die Suche der entsprechenden Darstellungen aufgewendet werden müssen (entsprechende empirische Studien der Arbeitsgruppe um Mayer: Mayer, 2001, S.90f.)
- **Prinzip der zeitlichen Kontingenz:** Es wird besser gelernt, wenn Wort und Bilder gleichzeitig (zeitlich kontingent) präsentiert werden, als wenn sie nacheinander präsentiert werden, weil Lernende zeitlich simultan präsentierte Inhalte besser im Arbeitsgedächtnis halten und damit besser miteinander in Beziehung setzen können (entsprechende empirische Studien sind in Mayer, 2001, S.104 aufgezählt).
- **Prinzip der Kohärenz:** Es wird besser gelernt, wenn multimediale Präsentationen kein irrelevantes Material enthalten, weil irrelevantes Material kognitive Ressourcen besetzen kann, Aufmerksamkeit auf sich ziehen kann und Lernende dazu bringen kann, die Lerninhalte um solche irrelevanten Inhalte herum zu ordnen (für empirische Untersuchungen aus der Arbeitsgruppe von Mayer s. Mayer, 2001, S.121f, S.127f, S.131f.)
- **Modalitätsprinzip:** Es wird aus einer multimedialen Präsentation besser gelernt, wenn Text gesprochen (d.h., auditiv präsentiert wird), als wenn er auf dem Bildschirm, beziehungsweise auf Papier präsentiert wird, denn im Falle der Präsentation von geschriebenem Text kann das visuelle kognitive Subsystem überlastet werden (empirische Untersuchungen der Arbeitsgruppe von Mayer: Mayer, 2001, S. 142)..
- **Redundanz-Prinzip:** Es wird besser von Animation und auditiv präsentierten Erzählungen gelernt, als von Animationen, auditiv präsentierten Erzählungen und Text, weil auch hier das visuelle Subsystem sonst überlastet werden kann (empirische Untersuchungen: Mayer, 2001, S. 156f).
- **Prinzip der individuellen Differenzen:** Lerner mit niedrigerem Vorwissen lernen besser aus multimedialen Präsentationen als solche mit hohem Vorwissen, Lerner mit gutem räumlichen Vorstellungsvermögen lernen aus multimedialen Präsentationen besser als solche mit schlechtem räumlichen Vorstellungsvermögen (empirische Untersuchungen: Mayer, 2001, S. 169ff.). Andere Arbeiten in diesem Bereich scheinen allerdings eine differenziertere Sichtweise nahe zu legen: Einige Arbeiten zeigen, dass nicht generell niedriges Vorwissen, sondern eher bereichsspezifisches niedriges Vorwissen, gekoppelt mit Wissen zur Interpretation von Bildern zu guten Lernerfolgen führt (Lewalter, 1997; Joseph & Dwyer, 1984; Scaife & Rogers, 1986).

Schnotz und seine Arbeitsgruppe (z.B. Schnotz & Preuss, 1997, Schnotz & Bannert, 2003) legen in ihren Arbeiten besonderen Wert auf die zweite, die semiotische Ebene. Da ihre Betrachtungsweise

für diese Arbeit eine wichtige Rolle spielt, wird sie eingehender behandelt und auf das Thema dieser Arbeit bezogen.

Nach Schnotz & Preuss (1997) bestehen propositionale Repräsentationen aus komplexen Symbolen, während mentale Modelle als analoge Abbildungen von Objekten, Szenarios oder Abläufen verstanden werden (Schnotz & Preuss, 1997). Die Unterschiede zwischen den Repräsentationssystemen Text und Animation lassen sich durch ihre semiotischen Eigenschaften beschreiben (s. Schnotz, 1997): Propositionale Repräsentationen des Teilchenmodells und der entsprechenden makroskopischen Phänomene als symbolische mentale Systeme sind deskriptionale Beschreibungen. Sie zeichnen sich durch ihre arbiträre Struktur aus, d.h. sie besitzen extrinsische Struktureigenschaften, die alle Arten von Beziehungen zwischen internen Repräsentationen von Teilchenmodell und internen Repräsentationen von Oberflächenmodellen der Stoffe ermöglichen. Mentale Modelle des Teilchenmodells und der entsprechenden makroskopischen Erfahrungsbereiche hingegen stellen depiktionale Repräsentationen des Arbeitsgedächtnisses über die Zeit dar, die die räumlich-zeitliche Beschaffenheit der jeweiligen Gegenstandsbereiche erfassen. Sie besitzen inhärente, intrinsische Struktureigenschaften, also solche, die von vorneherein mit Struktureigenschaften des jeweiligen Gegenstandsbereichs übereinstimmen. Ihre Repräsentationsfunktion beruht auf diesen gegebenen Ähnlichkeiten, sie zeigen die Beschaffenheit des Gegenstands (Schnotz, 1997). Wie nun oben erwähnt, gibt es im Falle des Teilchenmodells zwei Typen von Beziehungen zwischen den mentalen Repräsentationen von Teilchenmodell und makroskopischem Modell:

Erstens handelt es sich um Beziehungen, die aufgrund von gemeinsamen intrinsischen Struktureigenschaften bestehen (z.B. Masse, Volumen und Geschwindigkeit von mental vorgestellten Teilchen und mentalem Oberflächenmodell). Sie können durch mentale Modelle gezeigt als auch durch propositionale Repräsentationen beschrieben werden.

Zweitens gibt es aber abstrakte Beziehungen, die nicht auf solchen gemeinsamen intrinsischen Struktureigenschaften beruhen und daher nur durch propositionale Repräsentationssysteme erfasst werden können. (Die Beziehung zwischen kinetischer Energie von Teilchen und der Temperatur eines Stoffes, oder zwischen dem Aggregatzustand und der Nah- bzw. Fernordnung von Teilchengruppen sind Beispiele dafür.) Weil propositionale Repräsentationssysteme beide Relationsarten ausdrücken können, sind sie ausdrucksmächtiger (s.a. Schnotz, 1997, S.222).

Mentale Modelle des Teilchenmodells sind als depiktionale Abbildungen nur hinsichtlich der räumlich-zeitlichen Struktur des Teilchenmodells vollständig, können aber diejenigen Modellrelationen nicht erfassen, die abstrakter Natur sind. Das bedeutet, dass zu einer vollständigen kognitiven Erfassung des Teilchenmodells teilweise propositionale Repräsentationen geeigneter sind. Mentale Modelle der makroskopischen und der submikroskopischen Ebene sind aber bezüglich ihrer Berechnungseffizienz höher, da sie erlauben, die räumlich-zeitlichen Eigenschaften der Gegenstandsbereiche direkt abzulesen. Weidenmann (1994) drückt das so aus: Sprache wird im Vergleich zu Bildern als schwierig erlebt, wenn sie z.B. Folgendes kommunizieren soll: das Aussehen von Objekten, die Beschaffenheit von Szenen, den Ablauf von Ereignissen, räumliche Konstellationen, die gleichzeitige Veränderung mehrerer Komponenten eines Systems. Bilder ermöglichen leichter als sprachliche Beschreibungen die Anwendung von Prozessen wie Vergleichen, Erkunden und Entdecken, Strukturieren, Gruppieren. Weiterhin sind die mentalen Modelle robuster (da sie unempfindlicher gegen teilweisen Verlust ihrer Bestandteile sind). Schließlich besitzen sie höhere Konsistenz, da sie als depiktionale Repräsentationen makroskopisch existierender Teilchensysteme und Oberflächeneigenschaften von Stoffen keine Inkonsistenzen zulassen (Schnotz, 1997).

Schnotz (1997) nimmt an, dass mentale Modelle aus Bildern in parallelen, visuellen Routinen gewonnen werden, die als datengeleitete Prozesse, relativ unabhängig vom Vorwissen und den Zielsetzungen des Individuums ablaufen. Diese Eigenschaften, zusammen mit den oben genannten Charakteristika mentaler Modelle (Zeigefunktion, Berechnungseffizienz, Robustheit und Konsistenz) macht den primären Erwerb des Teilchenmodells der Stoffe und seiner Beziehungen zur makroskopischen Ebene über die externe Repräsentationsform von bewegten Bildern besonders geeignet. Damit verbunden ist allerdings, dass ein solcher Lernvorgang nicht die abstrakten Relationen zwischen Teilchenmodell und makroskopischen Beobachtungen (z.B. zwischen kinetischer Teilchenenergie und wahrgenommener Temperatur) umfasst. Stattdessen weist die Zeigefunktion

mentaler Modelle hier in die falsche Richtung und induziert ähnliche Modellrelationen, wie sie für die einfachen Beziehungen zwischen den Modellen gebildet wurden. Diese im wissenschaftlichen Modell falschen Relationen verursachen die bekannten Misskonzeptionen. Die korrigierten, richtigen abstrakten Relationen können also dementsprechend besser über Verarbeitungsprozesse auf der propositionalen Ebene gebildet werden.

3.4.3.2 Lernen mit Animationen

Die bis jetzt in diesem Abschnitt vorgestellten empirischen Arbeiten und die entsprechenden Erklärungsmodelle sind meist mit Bildern als visuellen Informationsträgern durchgeführt worden. Es folgen einige Resultate für Animationen, bzw. Simulationen.

Untersuchungen von Lewalter (1997) zeigten, dass Animationen als Lernmaterial verglichen mit Bildern keine verbesserten Lernerfolge bewirken. Auch die Untersuchung von Schnotz, Böckheler & Grondziel (1999) zur Lernwirksamkeit von Animationen im Bereich der Geografie zeigte, dass Animationen gegenüber Bildern keine besseren Lernerfolge bewirken.

Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass Animationen lediglich dann zu einem verbesserten Lernerfolg führen, wenn sie im Zusammenhang mit einer verbalen Beschreibung kombiniert werden (Levie & Lentz, 1982; Mayer, 1997; Mayer & Andersen, 1991; Mayer & Gallini, 1990).

Untersuchungen von Rieber (1989, 1990, 1991) zeigten keine einheitlichen Resultate der Lernwirksamkeit von Animationen. Bei hohem Schwierigkeitsgrad des Lernmaterials und keiner Aufmerksamkeitslenkung auf die Animationen bewirkten diese keine besseren Lerneffekte als Texte und Bilder (Rieber, 1989). Erst leichteres Lernmaterial und Aufmerksamkeitslenkung auf die Animationen erbrachten in weiteren Studien einen positiven Effekt der Animationen. In einer weiteren Untersuchung (Rieber, 1990) ließ er die Versuchspersonen die Animationen zu den Newtonschen Bewegungsgesetzen interaktiv beeinflussen. Unter diesen Bedingungen lernten die Versuchspersonen mit Animationen besser als mit den anderen Repräsentationsformen. In einer weiteren Studie (Rieber, 1991) zeigte sich, dass Versuchspersonen, die mit Animationen lernten, mehr implizit in den Animationen enthaltene Information erinnerten, als dies Versuchspersonen taten, die mit Bildern lernten. Dieses Ergebnis weist auf eine Gefahr hin, dass eher nebensächliche, eventuell „falsche“ Informationen beim Lernen aus Animationen zu unerwünschten Konzepten führen können. Insgesamt führen in den entsprechenden empirischen Studien Animationen oft zu keinen verbesserten Lernerfolgen. Unter der Bedingung, dass Text und Animation aufeinander abgestimmt werden, steigt der Lernerfolg allerdings. Besondere Effekte scheint eine Aktivierung der Lernenden bei der Auseinandersetzung mit Animationen zu versprechen, beispielsweise durch interaktive Steuerung der animierten (simulierten) Darstellungen (Rieber, 1991).

3.4.3.3 Qualitative und quantitative Repräsentationen der Lernaufgaben

Die Darstellung der wissenschaftlichen Beschreibungen des Teilchenmodells der Gase, die für das Erlernen einer ersten Teilcheninterpretation relevant sind (z.B. ideales Gasgesetz) erfolgt meistens durch algebraische Gleichungen. Diese Beschreibungsform wird hier quantitativ genannt (s.z.B. Plötzner, 1994; 1998). Mit ihnen werden numerische Beziehungen zwischen zwei oder mehr Gasgrößen in algebraischer Form dargestellt. Die algebraischen Gleichungen werden benutzt, um eine gegebene Größe abhängig von anderen zu bestimmen, wobei in der Regel Randbedingungen beachtet werden müssen. Die Gasgesetze gelten beispielsweise nur unter der Randbedingung, dass keine sehr tiefen Temperaturen und keine sehr hohen Drücke gegeben sind, da unter solchen (allerdings stoffspezifischen) Bedingungen die Substanzen als Flüssigkeiten vorliegen.

Für das initiale Erlernen des Teilchenmodells der Stoffe (aber auch für das schnelle Vorhersagen von Gasverhalten im Alltag) ist eine solche algebraische Repräsentation nicht geeignet. Denn selbst einfache Gleichungen wie das allgemeine Gasgesetz oder die Berechnung des submikroskopischen Teilchendruckes auf eine Wand (s. Kap.3) sind z.B. bei sich ändernder Temperatur von Schülerinnen und Schülern nicht in kurzer Zeit mehrfach im Kopf zu lösen, um den sich entsprechenden Gas- bzw. Teilchendruck zu ermitteln.

Analoge Probleme treten auch bei der Beschreibung des Anfängerverhaltens beim Lernen physikalischer Wissensbereiche auf.

In den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts sind deshalb nicht-numerische Beschreibungsweisen für physikalische Phänomene und Gesetzmäßigkeiten entwickelt worden, die die Schwierigkeiten bei der mentalen Repräsentation naturwissenschaftlicher Phänomene überwinden sollten. Sie werden auch qualitative Darstellungen solcher Phänomene genannt.

Larkin (1983) unterscheidet diesbezüglich vier verschiedene Repräsentationstypen:

- Eine verbale Repräsentation, die die entscheidenden Begriffe enthält.
- Eine naive Repräsentation, die eine oberflächenorientierte Skizze der Situation enthält.
- Eine qualitative wissenschaftliche Repräsentation, die abstrakte physikalische Konzepte enthält. Qualitative wissenschaftliche Repräsentationen spezifizieren die Konzepte, die in bestimmten Problemsituationen bedacht werden müssen, die Bedingungen, unter denen sie angewendet werden können, die physikalischen Objekte auf die die Repräsentation angewendet werden, ihre Attribute und deren Werte, sowie die Beziehungen zu anderen Konzepten (Plötzner, 1994, S.44f).
- Eine quantitative wissenschaftliche Repräsentation mit den für das Problem relevanten mathematischen Gleichungen.

Nach Plötzner (1994) sind qualitative und quantitative Repräsentationen keine sich ausschließenden Darstellungen, sondern Extreme auf einem Kontinuum. Ein Grund hierfür ist, dass die quantitativen Darstellungen sich historisch aus den qualitativen entwickelt haben, z.B., weil die nötigen mathematischen Formalisierungen erst entwickelt werden mussten (z.B. die Differentialrechnung).

Mit dem Begriff der qualitativen Repräsentation verbunden ist der Begriff der Qualitativen Physik, der hauptsächlich in der Künstlichen Intelligenz beheimatet ist. Die Qualitative Physik (Forbus, 1984, 1988; Weld & Kler, 1990) versucht, physikalische Phänomene mittels qualitativer wissenschaftlicher Darstellungen so zu repräsentieren, dass das Verhalten komplexer physikalischer Phänomene (z.B. komplexer technischer Systeme) kontinuierlich und sich abwechselnden Bedingungen simuliert werden kann. Für seine Qualitative Prozesstheorie setze Forbus (1984) z.B. als zentralen Begriff auf den „Prozess“. Damit ein auf solche Weise simulierter physikalischer Prozess auf dem Rechner ablaufen kann, wird er bezüglich einer Menge an involvierten physikalischen Objekten, bezüglich genereller Vorbedingungen für seinen Ablauf und quantitativer Bedingungen bezüglich der Objekte definiert. Weiterhin werden die Beziehungen zu anderen Objekten und Wirkungen des Prozesses definiert.

In dieser Arbeit werden qualitative wissenschaftliche Repräsentationen verwendet, um sowohl die Aufgabenanalyse auf dem Lehrplanniveau des Anfängerunterrichts zu leisten als auch, um eine angemessene Darstellung ihrer Repräsentation bei Schülerinnen und Schülern während des Lernprozesses zu erreichen. So können die oben beschriebenen Probleme der quantitativen Darstellung vermieden werden, ohne dass auf eine kognitionswissenschaftliche Analyse verzichtet werden muss.

3.4.4 Befunde zum Erwerb von Bereichswissen aus der kognitiven Entwicklungspsychologie

Lange Zeit wurde Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung in allgemeinen, strukturverschiedenen Entwicklungsstufen auf die Lernvorgänge im naturwissenschaftlichen Unterricht angewandt. Seit den 70er Jahren wurden viele dem widersprechende empirische Ergebnisse veröffentlicht (z.B. Carey, 1985), sodass kognitive Entwicklungspsychologinnen heute Erklärungen vorziehen, die sich auf bereichsspezifische Entwicklungen konzentrieren. Die wichtigsten empirischen Indizien waren, dass viele von Piaget angenommene stadienspezifische Defizite so nicht bestehen und dass es kaum synchrone bereichsübergreifende kognitive Veränderungen gibt (Sodian, 1995). Im Gegenteil zeigte

zum Beispiel die Pionierstudie von Chi (1978) an Schachspielern, dass solche Kinder, die viele Erwachsene im Schach schlagen, diesen auch in Gedächtnistests des Inhaltsbereichs überlegen sind. Generell wurde aus solchen Untersuchungen der Schluss gezogen, dass das Vorwissen in spezifischen Bereichen die kognitiven Leistungen in diesen Bereichen am stärksten bestimmt. In spezifischen Forschungsbereichen wie der Alltagsbiologie und -physik von Kindern hat sich gezeigt, dass Kinder Vorstellungen benutzen, die mit modernen wissenschaftlichen Modellen unvereinbar sind (z.B. mentalistische Erklärungen für Pflanzenphänomene). Diese Modelle sind in der Regel resistent gegen Korrektur und Instruktion. In Sodian's (1995) Interpretation wird das damit erklärt, dass Kinder eine kohärente Theorie für ein Phänomen aufgebaut haben: Wenn man den Wissenserwerb des Kindes als Prozess des Theoriewandels versteht, dann wird erklärbar, warum viele Irrtümer von Kindern so schwer korrigierbar sind: Es handelt sich nicht einfach um faktische Irrtümer, die durch korrekte Information leicht richtig gestellt werden können, sondern um alternative Denkwesen, die nur im Rahmen des begrifflichen Systems, in dem sie stehen, verstehbar sind, und deren Korrektur die Modifikation dieses Gesamtsystems voraussetzt (Sodian, 1995). Studien wie die von Vosniadou (1991, 1994) oder Carey (1991) über die kindlichen Intuitionen über Astronomie und Dichte haben die kindlichen Konzeptsysteme und -entwicklungen dieser Bereiche unter dem Einfluss von Instruktion beschreiben können. Ungeklärt bleibt, ob dabei intuitive Theorien grundlegend qualitativ umstrukturiert werden, wie es z.B. die Gruppe um Chi (1994) mit ihrer Theorie des ontological change vertritt, oder um es sich eher um kognitive Bereicherungen handelt. Die Frage der im Detail beteiligten kognitiven Mechanismen bleibt in diesen Arbeiten unbehandelt.

Die Ergebnisse der kognitiven Entwicklungspsychologie scheinen mir folgende Vermutungen für den Erwerb des Teilchenmodells nahe zu legen: Kinder haben während des Heranwachstums umfassende Denksysteme über ihre stoffliche Umwelt ausgebildet, die von der Didaktik noch nicht genügend detailliert beachtet werden. Kinder scheinen weiter beim Umgang mit neuen Inhalten Wissen aus anderen Bereichen zu benutzen. Es liegt damit nahe, dass sie beim Aufbau von Vorstellungen über unsichtbare Teilchen Wissen über Teilchensysteme aus dem Alltag benutzen.

3.5 Schlussfolgerungen für diese Arbeit

Aus fachwissenschaftlicher Sicht bewegen sich die Inhalte dieser Arbeit im Rahmen des realen Gasmodells von van-der-Waals. Das heißt, dass auf der Teilchenebene eine Modellvorstellung ausreicht, die ausgedehnte Teilchenkugeln und Feldkräfte zwischen diesen Kugeln annimmt. Als Phänomene zur Einführung des Teilchenmodells wurden für die Arbeit die „Diffusion“ von Gasen, die Brownsche Bewegung und die thermische Expansion von Gasen ausgesucht. Dabei wurde eine fachwissenschaftlich nicht korrekte, aber lernpsychologisch geeignete Interpretation der „Diffusion“ von Gasen für die weitere Arbeit gewählt (wobei davon ausgegangen wird, dass dies deswegen unproblematisch ist, weil es eine Eigenheit des Erwerbs wissenschaftlicher Stoffmodelle, dass die initial erworbenen Modelle im Laufe der Zeit permanent teilweise verworfen und verändert werden müssen). Die Feldkräfte zwischen den Teilchen sind für die zentralen Erklärungsteile der drei behandelten Phänomene zwar nicht nötig, werden aber immer dann gebraucht, wenn z.B. die Eigenheiten der umgebenden Apparatur erklärt werden wollen.

Aus fachdidaktischer Sicht gibt es mittlerweile eine große Zahl von Studien, die sich mit Alltagsvorstellungen zu Stoffen und mit den Vorstellungen zu Teilchenmodell beschäftigen, die während des Unterrichts gebildet werden. Für die lernpsychologischen Teile dieser Arbeit lassen sich die empirisch gefundenen Alltagsvorstellungen als Mischkonzepte verstehen, die durch analoge Übertragungen von Unterrichtsinhalten auf Teilchenkonzepte entstehen, die in der Regel aus Alltagsvorstellungen von Teilchensystemen aufgebaut wurden. Es gibt mittlerweile eine Reihe von fachdidaktischen Vorschlägen, Stoffmodelle auf neuen Wegen einzuführen. Aus der Sicht dieser Arbeit leisten die Vorschläge wichtige Beiträge, etwa indem sie die Probleme der Modellbildung explizit behandeln oder indem sie das Verhältnis von Systemen und ihren Bestandteilen für das Teilchenmodell fruchtbar machen. Wenn es allerdings auch ein Ziel dieser Arbeiten ist, gemäß den Lehrplanvorgaben „korrekt“ Stoffphänomene mit dem Teilchenmodell zu erklären, tritt das

bisher bis auf allgemeine Bemerkungen (etwa, dass Alltagswissen auf das Teilchenmodell übertragen wird oder dass Analogien dabei eine Rolle spielen) nicht detailliert behandelte Problem der individuellen kognitiven Lernprozesse auf.

In der Kognitionspsychologie (bzw. Kognitionswissenschaft) gibt es eine Reihe von Modellen des Lernens mit Analogien, die auf den Erwerb des Teilchenmodells angewendet werden können. Um den Aufgabenumfang dieser Arbeit nicht zu überdehnen, werden im weiteren Verlauf die konnektionistischen Theorien ACME zum Lernen von Analogien und ECHO zur Erklärungsfindung von Holyoak, Thagard und ihren Arbeitsgruppen verwendet. Diese im Vergleich zu weiterentwickelten Modellen noch relativ einfachen Ansätze haben zwar Nachteile im Bereich ihrer psychologischen Gültigkeit (etwa durch unrealistische Annahmen über menschliche Informationsverarbeitungskapazitäten), sie können allerdings aufzeigen, ob und teilweise wie das Lernen mit Analogien die empirischen Forschungsergebnisse der Alltags- bzw. Mischkonzepte erzeugen kann, die in vielen Arbeiten gefunden wurden. Das Modell ACME soll im Fortgang dieser Arbeit dazu verwendet werden, analoge Lernprozesse zu fassen und zu erklären, das Modell ECHO soll auf diesen Lernfortschritten aufsetzend zeigen, wie sich Phänomenerklärungen mit dem Teilchenmodell durch diesen Wissenszuwachs verändern.

Das Lernen mit multiplen Repräsentationen kann in diesem Zusammenhang nicht vernachlässigt werden, obwohl es in dieser Arbeit keine zentrale Rolle spielt, weil das Analogielernen und die Erklärungsfindung mit propositionalen Repräsentationen im Fokus dieser Arbeit stehen. Die intensivere Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Lernen mit Propositionen und den kognitiven Prozessen beim Umgang mit z.B. den visuell-dynamischen Darstellungen der Teilchensimulation des Konstruktionsprogramms muss späteren Arbeiten vorbehalten bleiben. Als Rahmenmodell für die Erklärung des Lernens mit multiplen Repräsentationen wird wegen seiner Differenziertheit in dieser Arbeit das Modell von Schnotz (z.B. Schnotz & Bannert, 2003) verwendet.

Kapitel 4

Das Arbeitsvorhaben dieser Dissertation

Die Kapitel 1 bis 3 zusammenfassend präzisiert die einzelnen Vorhaben dieser Arbeit:

- Erstellen einer computerbasierten Konstruktionsumgebung zur Erstellung eines dynamischen Teilchenmodells durch Lernende. Diese Konstruktionsumgebung soll zu Untersuchungszwecken, aber auch für einen Unterricht gemäß dem Lernprozessmodell dieser Arbeit verwendbar sein.
- Erstellen einer kognitiven Aufgabenanalyse, in der detailliert aufgezeigt wird, welche Wissensselemente notwendig sind, um die verwendeten Lernaufgaben („Gasdiffusion“, Brownsche Bewegung, thermische Luftexpansion) mit dem in den Lehrplänen beschriebenen Teilchenmodell zu erklären.
- Durchführung von drei empirischen Studien, die das Lernprozessmodell zum Erwerb des Teilchenmodells, Einflussfaktoren auf diesen Lernprozess und die Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung überprüfen.
- Erstellen einer kognitiven Simulation des Lernprozesses, die die zentralen empirischen Ergebnisse einer der Studien zur Untersuchung des Lernens mit Analogien generieren soll.

4.1 Erstellung einer Konstruktionsumgebung für ein dynamisches Teilchenmodell

Im nächsten Kapitel soll die Software vorgestellt werden, die bei zwei der empirischen Untersuchungen dieser Arbeit in Teilen benutzt wurde und die es auch im Unterricht Schülerinnen und Schülern ermöglicht, zu einfachen Stoffphänomenen aktiv und eigenständig korrespondierende dynamische Teilchenmodelle zu erstellen.

4.2 Kognitive Aufgabenanalyse

Für eine detaillierte kognitive Untersuchung des Lernprozesses wird im darauf folgenden Kapitel eine umfassende und detaillierte so genannte kognitive Aufgabenanalyse vorgenommen werden. Sie hat eine fachdidaktische und eine kognitionspsychologische Funktion: Für die stärker auf die fachlichen Aspekte konzentrierte fachdidaktische Sichtweise liefert die kognitive Aufgabenanalyse explizit die Elemente des Fachwissens, die für eine lehrplangerechte Lösung der vorgegebenen

Zielfertigkeiten nötig sind (der Lehrplan bestimmt also Umfang und Art der Zielvorgaben). Die auf die kognitive Aufgabenanalyse folgenden Schritte dieser Arbeit – Erarbeitung eines Lernprozessmodells sowie eines Lernwerkzeugs wie deren empirische Überprüfungen - beziehen sich dann bezüglich der Lerninhalte auf die Wissens Elemente, die von der kognitiven Aufgabenanalyse herausgearbeitet worden sind. Dabei gilt einschränkend auch für die kognitive Aufgabenanalyse, was schon im einleitenden Kapitel für die allgemeine Ausrichtung dieser Arbeit gesagt wurde, dass sie sich nämlich auf die kognitiven Wissens Elemente beschränkt und die weiteren pädagogisch-didaktisch wichtigen Dimensionen der Lernziele um der gründlichen Aufarbeitung diesen einen Faktors willen zurückstellt.

Die kognitive Aufgabenanalyse liefert den Wissensrahmen, für den im nächsten Schritt ein lernpsychologisch plausibles Lernprozessmodell erarbeitet werden soll. Die kognitive Aufgabenanalyse umfasst damit eine modelltheoretisch begründete Beschreibung der Lernaufgabe (Kapitel 5), die zunächst einmal die kognitiven Fertigkeiten identifiziert, die für einen korrekten Gebrauch modellgestützter Erklärungen und Vorhersagen nötig sind. Dabei sollen mehrere Randbedingungen gelten:

Folgende makroskopischen Phänomene werden in dieser Arbeit behandelt und als mögliche Einführungssequenz in das Teilchenmodell benutzt:

- „Diffusion“ von Gasen durch Ton.
- Brownsche Bewegung in Gasen.
- Thermische Volumenänderung von Gasen.

Die Gründe liegen darin, dass die hier gewählten Modellerklärungen dieser Phänomene einfach sind, dass sie ein sukzessiv komplexer werdendes Teilchenmodell erfordern und dass auf der makroskopischen Ebene, also experimentell leicht zu realisieren sind.

Die „Gasdiffusion“ durch Ton hebt auf die unterschiedlichen Teilcheneigenschaften unterschiedlicher Gase ab, die Brownsche Bewegung auf die permanente Bewegung und die Kollisionen kleinster Teilchen, die thermische Volumenänderung auf die Modellrelation zwischen Temperatur und Translationsenergie der Modellteilchen. Da bei der Erklärung dieser drei Versuche aber weitere Modellrelationen und -eigenschaften herangezogen werden müssen, können sie zur relativ breiten Einführung des Teilchenmodells der Stoffe benutzt werden.

Die Modellaussagen über Teilchen sollen zunächst nur für das entsprechende Phänomen gelten, Modelle sollten nach Möglichkeit also nur über die eingeführten und verarbeiteten Phänomene generalisiert werden und nicht willkürlich gesetzt werden. Der lernpsychologische und pädagogische Grund ist, dass die Schülerinnen möglichst eigenständig und mit möglichst wenig gesetzten Vorgaben aktiv mit dem Teilchenmodell und der Veränderbarkeit von Modellen experimentieren sollen, um hypothetischen Charakter, Veränderbarkeit und Zweckgebundenheit eines solchen Modells zu erfahren.

Bei der Einführung des Teilchenmodells sollen Stoffphänomene qualitativ erklärt werden, quantitative Aspekte werden erst für Fortgeschrittene wichtig. Dafür gibt es drei Gründe:

- Fehlendes mathematisches Wissen der Lernenden zur quantitativen Formulierung
- Fehlendes physikalisches Wissen, vor allem der klassischen Mechanik
- Wahrscheinliche Überforderung der Schülerinnen, da neben der Entwicklung der konkreten Eigenschaften des Teilchenmodells und der für die Schülerinnen nicht einfachen qualitativen Modellbeziehungen zwischen Phänomenen und Modellwelt mit der quantitativen Beschreibung eine weitere schwierige Modellierung eingeführt würde.

4.3 Empirischer Teil der Arbeit: Überprüfung des Lernprozessmodells und des Lernwerkzeugs

Im empirischen Teil dieser Arbeit werden mehrere Fragen untersucht:

Zunächst wird eine explorative Studie vorgestellt, die anhand einiger Einzelfälle untersuchen soll, ob und wie analoge Lernprozesse und das Lernen mit multiplen Repräsentationen auf den Teilchenmodellerwerb angewendet werden können. In einer zweiten Untersuchung werden vor allem änderungssensitive Testaufgaben zur Untersuchung des Lernfortschritts beim Teilchenmodellerwerb untersucht, während die wichtigsten Annahmen des erwähnten Lernmodells das Thema einer dritten empirischen Untersuchung sind.

4.4 Theoretische Interpretation der Untersuchung zum Lernen mit Analogien

Nach der Vorstellung der empirischen Untersuchungen soll im letzten Teil dieser Arbeit versucht werden, die zentralen Ergebnisse der dritten empirischen Untersuchung zum Lernen mit Analogien mithilfe der kognitiven Modelle ACME und ECHO nachzuvollziehen und bezüglich der notwendigen Annahmen und Ergebnisse genauer zu untersuchen.

4.5 Erwartetes Ergebnis der Arbeit

Als allgemeines Ergebnis dieser Arbeit wird ein lernpsychologisch fundierter Vorschlag zur computergestützten Einführung des Teilchenmodells im Unterricht der Sekundarstufe I erwartet, der den kognitionspsychologischen Randbedingungen Rechnung trägt, die in dieser Arbeit beschrieben werden. Der Vorschlag gründet auf die beschriebenen Arbeitsschritte:

- Vorstellung eines Computerprogramms zum Unterrichtseinsatz, das die Lernprozesse des Prozessmodells unterstützt und so als kognitives Lernwerkzeug dient, aber auch als Werkzeug für die Untersuchungen dieser Arbeit dienen kann.
- Identifikation des notwendigen Wissens für eine korrekte Lösung (im Rahmen des vom Lehrplan erwarteten Wissens) der lehrplangegebenen Zielprobleme „Diffusion“ von Gasen durch Ton, Brownsche Bewegung und thermische Gasexpansion durch eine kognitive Aufgabenanalyse.
- Überprüfung einiger zentraler Annahmen des Lernprozessmodells und des Lerneffekts des kognitiven Lernwerkzeugs in empirischen Untersuchungen.
- Überprüfung und weitere Ausarbeitung des Lernprozessmodells durch ein kognitives Simulationsmodell des Lernprozesses, dass zentrale Ergebnisse einer empirischen Untersuchung zum Lernprozessmodell generieren soll.

Der Unterrichtsvorschlag soll mittels der kognitiven Aufgabeanalyse und dem Lernprozessmodell Rahmenbedingungen abstecken, die aus lernpsychologischer Perspektive für den Erwerb des Teilchenmodells gelten. Auf diese Arbeit folgende erziehungswissenschaftliche und speziell fachdidaktische Perspektiven können weitere Rahmenbedingungen und auch neue Vorschläge für die Einführung des Teilchenmodells erbringen, lernpsychologische Randbedingungen für den Erwerb des Teilchenmodells der Stoffe sollten dabei in Zukunft als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingungen für den Lernerfolg berücksichtigt werden.

Kapitel 5

Entwicklung einer computerbasierten Konstruktionsumgebung zum aktiven Konstruieren eines dynamischen Teilchenmodells

Dieses Kapitel stellt knapp eine computergestützte Konstruktionsumgebung vor, mit der Schülerinnen und Schüler ihr eigenes dynamisches Teilchenmodell zur Erklärung von einfachen Stoffphänomenen konstruieren können. Grundideen der Software wurden bereits 1993 entwickelt und umgesetzt, die Entwicklung zur jetzigen Form wurde teilweise im Rahmen eines EU-SOCRATES-Projekts (CoSim) durchgeführt, das ausgehend von Ideen dieser Arbeit von der Arbeitsgruppe des Autors an der Universität Heidelberg beantragt und koordiniert wurde. Weil das Programm bereits an anderen Stellen (z.B. Hollstein, 2001) ausführlich dargestellt wurde, wird es hier nur knapp soweit in seinen Grundzügen vorgestellt, wie das für das weitere Verständnis dieser Arbeit notwendig ist. Die 2004 aktuelle Version der Software kann über das Institut für Fachdidaktik der Universität Essen bezogen werden.

5.1 Grundidee der in dieser Arbeit entwickelten Konstruktionsumgebung

Rohr (Rohr, 1993, 1995; Reimann & Rohr, 1999) und Hollstein (2001) entwickelten eine computerbasierte Lernumgebung, die den Ergebnissen der Aufgabenanalyse und den lernpsychologischen Anforderungen der letzten Kapitel entsprechen soll. Die Grundideen bei der Planung der Lernumgebung waren folgende:

- Die abstrakten theoretischen Konstrukte der submikroskopischen Teilchenebene sollen mittels Computerprogrammen in einer für Anfängerinnen und Anfänger handhabbaren und rechen-technisch einfach zu realisierenden Weise, nämlich als Kugelteilchen, visualisiert werden. Solche simulationsbasierten visuellen Analogien des Teilchenmodells bieten sich deshalb an, weil sie eine flexible Darstellung dieses komplexen Sachverhalts auf dem Computerbildschirm gestatten. Als Universalmaschinen können Computerprogramme im Prinzip jede berechenbare Visualisierung (z.B. prinzipiell auch eckige oder anders geartete Teilchenformen) auf

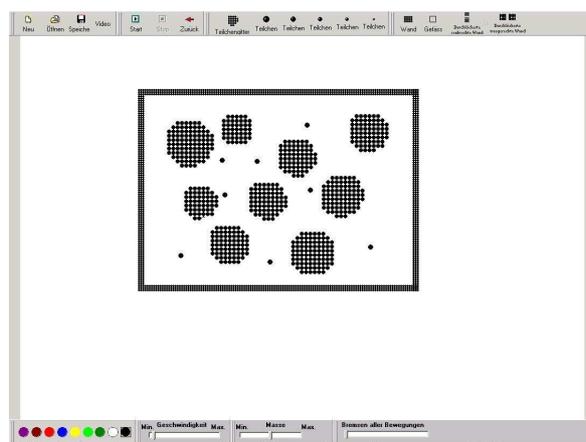


Abbildung 5.1: Oberfläche der Lernumgebung bei der Konstruktion einer Teilchensimulation der Brownschen Bewegung durch eine Schülerin während einer empirischen Untersuchung.

den Bildschirm bringen. Sie sind damit in ihrer Darstellung unendlich variantenreicher als gegenständliche Simulationen (z.B. Scheiben auf einem Luftkissen oder Tischtennisbälle in einem Luftstrom).

- Das dynamische Verhalten der Kugelteilchen soll durch eine Simulation des Bewegungsverhaltens der Teilchen berechnet und visuell verfolgbar gemacht werden. Auch hier spielt die Universalität des Rechners eine wichtige Rolle, weil im Prinzip jedes berechenbare dynamische Verhalten eines Teilchen dargestellt werden kann. Gegenüber den gängigen gegenständlichen Simulationsmodellen kann beispielsweise auch das Verhalten in chemischen Reaktionen visualisiert werden, sofern genügend Rechenkapazität zur Verfügung steht.
- Die Schülerinnen und Schüler sollen in einer Art Baukastensystem ihre eigenen dynamischen Modellartefakte konstruieren können. Die aktive Konstruktion eigener Artefakte ist ein Merkmal von Lernumgebungen, das eine entscheidende Verbesserung des Lerneffekts bewirkt (Telgenbüscher, 1999; White, 1991).
- Diese Modellartefakte sollen von den Lernenden zur Interpretation von einfachen chemischen und physikalischen Experimenten konstruiert werden, die entweder im Labor, als Demonstrationsversuche oder auch als digitalisierte Videos zugänglich sind.
- Die Modellartefakte sollten über E-Mail bzw. Dateiaustausch über Intra- bzw. Internet zwischen Lernenden austausch- und diskutierbar sein. Damit wird in der Lernumgebung kollaboratives Arbeiten möglich.

5.1.1 Kugelteilchensimulationen als Analogien

Computersimulierte Kugelteilchenszenarien werden in diesem Ansatz als Analogien des allgemeinen theoretischen Kugelteilchenmodells behandelt.

Die Beziehung zwischen einem Kugelteilchenmodell und seiner Computersimulation kann als Abstraktionsbeziehung beschrieben werden. Das Kugelteilchenmodell stellt deshalb eine Abstraktion der realisierten Computersimulation dar, weil das abstrakte Kugelteilchenmodell mittels einer Computersprache in eine reale und ablauffähige Konkretisierung umgesetzt wurde. Teilweise aus theoretischen, teilweise aber auch aus technischen und praktischen Gründen wurden dabei eine Reihe von Eigenschaften des gewählten Kugelteilchenmodells nur veränderter, teilweise vereinfachter Form implementiert.

In der psychologischen Forschung (z.B. Gentner, 1983; Weber 1994) werden Abstraktionen als Spezialfall von Analogien dargestellt. Eine abstrakte Theorie kann als Quellstruktur verstanden werden, deren Relationen - aber nicht deren abstrakte Objekte - in einen Anwendungsfall, die Zielstruktur, übertragen wird. Die Übertragung zwischen einer Quell- und einer Zielstruktur ist also formal der gleiche Vorgang wie die Anwendung einer allgemeinen Theorie (bzw. eines Modells) auf einen konkreten Anwendungsfall.

Der Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass damit die Theorien des Analogielernens auf das Arbeiten mit der Simulation angewendet werden können. Insbesondere können auch die Gefahren des Arbeitens mit einer anschaulichen Darstellung eines abstrakten Modells mit den Begriffen der Fehlerbildung beim Analogielernen beschrieben werden. Fehler beim Lernen aus Analogien können in Fehler erster Art (sie entstehen dadurch, dass nötige Eigenschaften nicht aus der Analogiequelle in den Zielbereich übertragen werden) und Fehler zweiter Art (sie entstehen dadurch, dass Eigenschaften aus der Quelle übertragen werden, deren Übertragung nicht erwünscht ist) aufgeteilt werden. Die Lernmechanismen des Lernens aus Analogien bieten aber auch darüber hinaus ein reichhaltiges Begriffsinstrumentarium vor allem zur Analyse der individuellen Lernprozesse, das bis hin zu einer Anzahl verschiedener Computersimulationen analoger Lernprozesse reicht. Analogien (bzw. fallbasiertes Lernen) können wichtige Hilfsmittel zur Erklärung und Erzeugung situationistischer Lernumgebungen sein, da sich mit ihnen die Beziehungen zwischen verschiedenen Situationen in geeigneter Weise analysieren lassen (Kolodner, 1997).

5.2 Relevante Gesichtspunkte der Theorien des Instruktionsdesigns

Die Theorien des Instruktionsdesigns für multimediale Umgebungen (für eine Einführung siehe z.B. Niegemann, 2001) beschreiben im Regelfall umfassendere Einführungen in ein Wissensgebiet als diese Konstruktionsumgebung, die sich eher auf einen zentralen Aspekt der Anfängerchemie konzentriert und auch eher als Ergänzung zum normalen Präsenzunterricht fungiert. Deshalb werden hier nur diejenigen Gesichtspunkte diskutiert, die für die Gestaltung der Konstruktionsumgebung eine Rolle spielen.

5.2.1 Sequenzierung

Eine wichtige Rolle spielt die Sequenzierung der Simulationsaufgaben in der Lernumgebung. In der momentanen Version wird sie den Lernenden/Lehrenden überlassen, wobei hier die Gefahr gegeben ist, dass sich die Lernenden anfangs Phänomene zur Erklärung vornehmen, die noch zu schwierig sind. Praktisch sollte bei der Weiterentwicklung des Programms die Möglichkeit gegeben werden, auf Wunsch einer vom Programm vorgegebenen Aufgabensequenz zu folgen. Die Empfehlungen, die in der Literatur zur Sequenzierung (z.B. Reigeluth, 1999) von multimedialen Instruktionsprogrammen gegeben werden, beziehen sich eher auf umfassendere Lernumgebungen, in denen Simulationen meist nur neben anderen Präsentationsformen auftreten. Deshalb werden hier nur einige Überlegungen vorgestellt, welche Richtlinien bei der Sequenzierung eine Rolle spielen könnten.

Eine mögliche Sequenzierungsregel für die Konstruktionsaufgaben wäre ein Aufbau vom Einfachen zum Komplexen. Kriterium ist der Komplexitätsgrad der submikroskopischen Modellebene, weil diese Ebene von den Lernenden neu aufgebaut werden muss. Nach dieser Festlegung sollten - wie schon erwähnt - Gasphänomene beim anfänglichen Aufbau des Teilchenmodells im Vordergrund stehen, weil zur Erklärung von Flüssigkeiten und Feststoffen von vorneherein ganze Teilchensysteme und die Teilcheninteraktionen durch Feldkräfte in den Blick kämen. Natürlich sollten auch die zu interpretierenden makroskopischen Gasphänomene anfangs möglichst einfach aufgebaut sein. Nach der kognitiven Aufgabenanalyse würde ein solcher Aufbau zunächst nur auf die Existenz und einfache Eigenschaften (Größe, Gewicht etc.) der submikroskopischen Teilchen abheben. Die

in der Sequenz dann folgenden Experimente können schon auf solche einfachen Eigenschaften der Teilchen abheben (wie Bewegung und Kollisionsfähigkeit), die zu Interaktionen zwischen Teilchen führen (wie bei der Erklärung der Brownschen Bewegung).

Ab diesem Zeitpunkt geraten Eigenschaften von ganzen Teilchensystemen in den Blick. Auf der Geschwindigkeitseigenschaft aufbauend können Feldkräfte zwischen den Teilchen eingeführt werden, die wiederum die Bewegung der Teilchen beeinflussen. Phänomene wie die Aggregatzustandsänderung von Stoffen können nun erklärt werden. Ab diesem dritten Schwierigkeitsniveau können nun auch chemische Phänomene, z.B. Bindungsaufbau zwischen zwei verschiedenen Teilchensorten modelliert werden.

Eine überzeugendere, weil auf die individuellen Lernvorgänge bezogene Sequenzierung könnte sich an lernpsychologischen Überlegungen, in diesem Fall speziell an Theorien zum Lernen durch Analogien orientieren. Nach den Überlegungen in Kapitel 3 bauen die Lernenden eine erste makroskopische (computersimulierte) diskontinuierliche Teilchenvorstellung auf, indem sie dafür eine Teilchenvorstellung aus dem Alltagsbereich durch Analogie mit dem makroskopischen Bereich verknüpft. Modelle analogen Denkens wie ARCS und ACME (s. Kap.3 und 8) beschreiben, unter welchen Bedingungen solche Verknüpfungen leicht gelingen. Wichtig sind zunächst deutliche syntaktische und semantische Verhaltensähnlichkeiten zwischen dem diskontinuierlichen Modell und dem makroskopischen Phänomen, das diskontinuierlich erklärt werden soll. Diese Verhaltensähnlichkeiten führen zu einer Verknüpfung zwischen den beiden Strukturen und damit zu einer Erklärungsmöglichkeit makroskopischer Phänomene durch das submikroskopische Teilchenverhalten. Damit diese Verknüpfungen also leicht möglich sind, müssen die makroskopischen Stoffe und ihr Verhalten leicht wahrzunehmen sein. Makroskopische Phänomene, bei denen z.B. die unsichtbare Luft und ihr nicht beobachtbares Verhalten (die unablässige Bewegung der Luftteilchen) keine für Anfänger offensichtliche Rolle spielt (Brownsche Bewegung von Zigarettenrauch in einer Rauchkammer), werden nach der Sichtweise des Lernens mit Analogien kaum mit dem Teilchenmodell der Simulation verknüpft. Danach wären also Versuche, wie die klar (wenn auch indirekt) beobachtbare Diffusion von Gasen durch eine Tonwand zum Einstieg geeignet, weniger die Brownsche Bewegung.

Nach den ersten Einstiegsversuchen können dann weiterhin schon bearbeitete Lösungen als sogenannte Fälle berücksichtigt werden, als Lerntheorie würde das fallbasierte Lernen zum Tragen kommen (Kolodner, 1993, 1997; Reimann, 1997). Fallbasiertes Lernen (Case-Based Learning, Case-Based-Reasoning, CBR) das dem Analogielernen nahe verwandt ist, betrachtet komplette Lösungsfälle (wie nach einmal erfolgter Lösung einer Simulationsaufgabe) als Vorbilder für neue Lösungsversuche und liefert dazu ausgearbeitete Szenarien. CBR-Verfahren sind oft und erfolgreich für die Konstruktion von adaptiven Lernprogrammen eingesetzt worden (z.B. Reimann 1997; Weber, 1994) und könnten auch in der Simulationsumgebung zur Konstruktion einer der Lernenden individuell angepassten Aufgabensequenz benutzt werden.

5.2.2 Exploration, Eigenaktivität und Motivation

Simulationsumgebungen wie die Teilchenlernumgebung bieten von vorneherein einen großen Spielraum für explorative Aktivitäten der Schülerin bzw. des Schülers und damit für selbst gesteuerte Aktivität. Insofern entsprechen sie Empfehlungen, wie sie z.B. das ARCS-Modell zur Motivation in Instruktionsdesigns gibt (Keller, 1983; Keller & Kopp, 1987).

5.2.3 Zum Verhältnis von grafischen und textlichen Elementen.

Untersuchungen zum Lernen mit multimedialen und multimodalen Elementen lassen vermuten, dass in einer solch komplexen, grafisch-dynamischen Umgebung mit hoher Informationsdichte Information während der eigentlichen Lernphasen nur über eine Codeform (also nur über grafische Darstellung) und auch nur über eine Sinnesmodalität (visuell) gegeben werden sollte (Baddeley, 1997, 2000; Guan, 2002). Dementsprechend arbeitet das Programm überwiegend mit graphischen

und ikonischen Darstellungen, verbale Information spielt eine untergeordnete Rolle (z.B. in Hilfenmenüs).

5.3 Oberflächengestaltung der Lernumgebung

Im Idealfall führen Schülerinnen und Schüler den makroskopischen Versuch selbst im Labor durch, er kann aber auch in einem Fenster als digitalisiertes Video oder Computeranimation beliebig oft abgespielt werden. Abgesetzt vom Fenster mit der makroskopischen Darstellung wird ein Simulationsfenster geöffnet, in dem die erklärende Teilchensimulation Stück für Stück aktiv konstruiert wird. Mit der Computermaus werden nacheinander verschiedene Kugelteilchen und Konstruktionselemente (z.B. Behälter oder Kolbenprober, die selbstverständlich auch aus Teilchen bestehen) im Simulationsfenster positioniert. Die einzelnen Elemente sind per Voreinstellung mit einer Reihe von Eigenschaften versehen (z.B. Teilchenmasse, -farbe und -anfangsgeschwindigkeit, Schwerkraftwirkung, Kollisionseigenschaften, Bewegungsreibung), die zum Teil bekannten Alltagskonzeptionen der Teilchen entsprechen. Diese Voreinstellungen können von Anfang an von den Lernenden in einzelnen Schritten modifiziert werden. Wenn sie ihr erstes Modell fertig gestellt haben, können sie die Simulation per Mausklick starten und parallel dazu das Video des makroskopischen Versuchs ablaufen lassen. Wenn sie feststellen, dass das Verhalten der Simulation nicht dem des makroskopischen Versuchs entspricht, kann die Simulation angehalten und verändert werden, um eine bessere Passung zwischen makroskopischer und submikroskopischer dynamischer Darstellung zu erreichen und damit ein erklärungskräftiges Teilchenmodell zu erzeugen. Beispielsweise kann eine voreingestellte Bewegungsreibung abgestellt werden, damit die Teilchen nicht nach kurzer Zeit ihre Anfangsbewegung verlieren. Darüber hinaus ist es zusätzlich möglich, den Startzustand von Simulationen in kleinen Dateien über Netzwerke auszutauschen, kooperativ zu diskutieren und zu verbessern. Die Gestaltung der Lernumgebung soll Lernende dabei unterstützen, zunächst aktiv ihr eigenes visuelles Teilchenmodell zu konstruieren und dabei zu erkennen, dass die makroskopische von der submikroskopischen Ebene getrennt ist. Die speicherbare Simulation des Teilchenmodells kann als Grundlage für weitergehende Schlussfolgerungen über das Teilchenmodell dienen. Die häufigen Veränderungen und die Möglichkeit, die Simulationen miteinander zu vergleichen, sollen metakognitive Reflexionen über die epistemologischen Eigenarten des Teilchenmodells erleichtern. Der Austausch von Simulationen unterstützt zusätzlich die Diskussion schwieriger Aspekte der Simulationen.

5.4 Technisches Grundproblem einer Simulation des Teilchenmodell in diskreten Schritten

Kurz soll auch ein grundsätzliches technisches Problem der Simulation des Teilchenmodells in einem diskreten Simulationsmodell erwähnt werden: In einem Computerprogramm müssen kontinuierliche Prozesse der Teilchenbewegung in diskrete Teilschritte zerlegt werden, was stellenweise prinzipielle Probleme verursacht. Z.B. kann durch eine Serie von Kollisionen die Geschwindigkeit eines Partikels so hoch werden, dass während eines Iterationszyklus des Programms von diesem Teilchen eine so große Wegstrecke zurück gelegt wird, dass sich mehrere Kollisionen in diesem einen Wegstück mit anderen Teilchen ereignen müssten. Die entsprechenden Analysen sind komplex und beispielsweise deshalb schwierig im Programm zu realisieren, weil sich Verzögerungen durch den erhöhten Rechenaufwand ergeben können.

Zudem stoßen komplexe Teilchenphänomene (wie manche chemische Reaktionen und quantenchemische Gesetzmäßigkeiten) oder analytisch nicht lösbare Berechnungsprobleme (z.B. bei der Umsetzung des Lenard-Jones-Potentials der Teilchenanziehung) an Leistungsgrenzen von Computersimulationen eines Teilchenmodells, in denen das dynamische Verhalten eines Vielteilchensystems visualisiert werden soll.

Kapitel 6

Aufgabenanalyse

Dieses Kapitel

- stellt ein Planschema für eine Referenzerklärung mittels einer qualitativ-wissenschaftlichen Repräsentation von Experimenten und Beobachtungen vor.
- zeigt Referenzlösungen der einzelnen Lernaufgaben in programmierter Form, implementiert in PROLOG, einer deklarativen Programmiersprache, die Wissensdarstellungen in einer Teilmenge der Prädikatenlogik erster Ordnung, den Hornklauseln ermöglicht (siehe z.B. Schmid & Kindsmüller, 1996, S.96ff).
- fasst die Ergebnisse jeder Aufgabenanalyse in einer vom Allgemeinen zum speziellen gehenden Hierarchieumgangssprachlich so zusammen, dass die Wissensvoraussetzungen und das im Unterricht zu erlernende Wissensinhalte für die weiteren Schritte dieser Arbeit verdeutlicht werden. Dieses Wissen der Musterlösungen (Voraussetzungen und zu Lernendes) beschreibt die fachlichen Inhalte, die für die Lernumgebung, das Lernprozessmodell die empirischen Untersuchungen betrachtet werden müssen.

6.1 Die Wissensvoraussetzungen des Kugelteilchenmodells als Grundannahmen der kognitiven Aufgabenanalyse

Bevor eine nicht-numerische Aufgabenanalyse der Erklärungsaufgaben geleistet werden kann, muss festgelegt werden, auf welche Wissensvoraussetzungen sie zurückgreifen kann. Damit diese Aufgabenanalyse für ein schülerbezogenes Lernmodell relevant wird, wird nur dasjenige Wissen vorausgesetzt, das im Unterricht gelernt werden soll.

Die Lehrpläne für die anfängliche Einführung des Teilchenmodells sind weitgehend ähnlich. Folgende Elemente, werden für die qualitative Aufgabenanalyse vorausgesetzt. Auf ihnen bauen die Modellerklärungen auf.

1. Die behandelten Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen, die zu klein sind, um mit optischen Mitteln beobachtet zu werden.¹
2. Ein Stoff besteht aus gleichen Teilchen, verschiedene Stoffe haben verschiedene Arten von Teilchen.
3. Die Teilchen der Gase werden als massive Körper verstanden, differenziertere Atommodelle werden auf diesem Niveau ausgeklammert.

¹Diese erste Aussage entspricht einem weltweiten Zugang zum Teilchenmodell. Aus diesen Gründen ist sie hier aufgenommen. Es ist indessen nicht ihre Kleinheit, die eine Beobachtung mit "optischen Mitteln" (gehört ein Rastertunnelmikroskop auch zu diesen Mitteln?) verhindert, sondern ihre konstitutionelle Andersartigkeit.

4. Die Teilchenform wird zwar als beliebig, einfachheitshalber aber zunächst als kugelförmig und der Stoß als vollständig elastisch angenommen.
5. Die Teilchen bewegen sich ohne Reibung, d.h. so lange sie keine Wechselwirkungen mit anderen Teilchen eingehen, verlieren sie keine Geschwindigkeit.
6. Nur der Einfachheit halber werden zunächst zentrale Kollisionen (der Einfachheit halber zwischen Kugeln) angenommen.
7. Es werden elastische Kollisionen zwischen den Kugeln angenommen. Es geht deshalb bei Kollisionen insgesamt keine kinetische Energie verloren.
8. Kräfte zwischen den Teilchen sind einfache Feldkräfte, die exponentiell mit dem Abstand zwischen den Teilchen abnehmen.

6.2 Ein Referenzmodell des Erklärungsgangs von Stoffverhalten durch das Teilchenmodell

6.2.1 Experiment und Beobachtung

Bei der Erklärung von empirischen Untersuchungen spielt eine Rolle, welche Erkenntnisstruktur zur Überprüfung oder Generierung von Hypothesen zu Grunde liegt. Für diese Arbeit reichen die Kategorien Experiment und Beobachtung aus. Die Grundstruktur eines Experiments besteht darin, eine unabhängige Größe zu manipulieren oder systematisch zu erfassen und die Auswirkung dieser Veränderungen auf eine abhängige Variable zu beobachten. Dabei werden alle anderen Variablen, die eine Rolle spielen, konstant gehalten. Insofern prüfen Experimente Zusammenhangshypothesen zwischen unabhängiger und abhängiger Variable. Bei einer Beobachtung wird lediglich ein die Veränderung einer Variable beobachtet und erklärt (d.h. auf elementare Gesetzmäßigkeiten zurückgeführt).

Die 3 Aufgaben beinhalten 2 Experimente („Gasdiffusion“ und thermische Gasexpansion) sowie 1 Beobachtung (Brownsche Bewegung). Die „Gasdiffusion“ von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton ist ein Experiment, weil in der gleichen Versuchsanordnung die unabhängige Variable, die Art des verwendeten Gases, und die abhängige Variable, das Auftreten von Gasblasen des jeweiligen Gases im Wasserbad, betrachtet werden. Bei der thermischen Gasexpansion wird der Zusammenhang zwischen dem Wert der Temperatur und dem Volumenwert eines Gases geprüft. Hingegen wird bei der Brownschen Molekularbewegung keine Variable manipuliert bzw. ihre Veränderung systematisch erfasst, sondern es wird lediglich für eine makroskopische Beobachtung die Entsprechung auf der submikroskopischen Modellebene gesucht.

6.2.2 Erklärungsgang für Experimente

Um eine korrekte Teilchenerklärung eines makroskopischen Phänomens zu konstruieren, muss neben dem korrekten deklarativen Wissen über Gase und Modelle auch prozedurales Steuerungswissen vorliegen, das den Ablauf der Erklärungskonstruktion steuert. Das folgende Modell erhebt keinen Anspruch auf psychologische Validität, sondern soll eine Referenzlösung (von vielen möglichen) vorschlagen. Allerdings erhebt der vorgeschlagene Plan Anspruch darauf, alle wichtigen Lösungselemente zu enthalten. Wie und ob diese von Menschen erworben und bei der Aufgabenlösung eingesetzt werden, ist eine kognitionspsychologische Fragestellung, die später im Kapitel über die empirischen Untersuchungen und ihre theoretische Interpretation behandelt wird.

Die Schritte einer qualitativen Modellerklärung eines gegebenen Experiments werden in folgender Reihenfolge abgearbeitet:

1. Finde die Modellrelationen für unabhängige und abhängige Variable

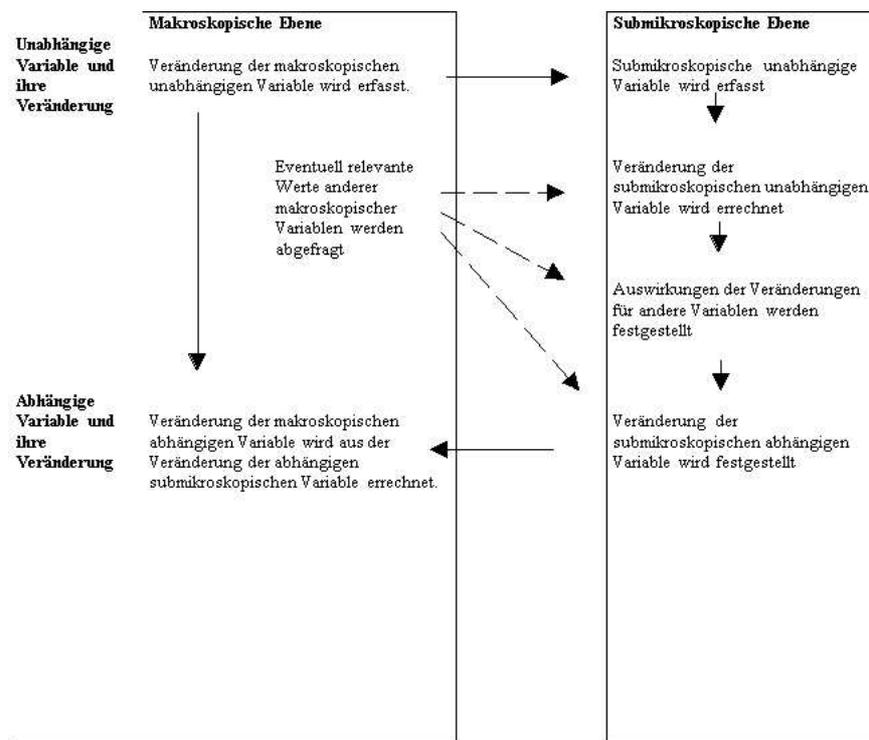


Abbildung 6.1: Ablaufschema einer Referenzlösung

2. Finde die qualitative Beziehung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable im submikroskopischen Modell.
3. Finde die qualitative Modellrelation zwischen abhängiger makroskopischer Variable und ihr entsprechender Modellvariablen (evtl. mehr als eine)
4. Erstelle eine qualitative Erklärungskette, die folgende Schritte enthält:
 - (a) von der Veränderung der unabhängigen makroskopischen zur Veränderung entsprechenden submikroskopischen Variablen
 - (b) von der unabhängigen submikroskopischen zur abhängigen submikroskopischen Variablen
 - (c) von der abhängigen submikroskopischen zur abhängigen makroskopischen Variablen.

Die Abbildung 6.1 verdeutlicht das gewählte Ablaufschema der Referenzlösungen.

6.2.3 Erklärungsgang für Beobachtungen

Bei der Modellerklärung einer Beobachtung muss lediglich die Beobachtungsvariable auf die Modellebene abgebildet und dort eventuell auf basale Gegebenheiten zurückgeführt werden. Mit basalen Gegebenheiten sind Wissensbestände gemeint, die als gewusst oder als evident gegeben hingenommen und nicht mehr weiter erklärt werden müssen (diese Vorgehensweise ist nötig, um einen infiniten Regress zu vermeiden).

6.2.4 Referenzlösung der „Gasdiffusion“ durch einen Tonzylinder in einer qualitativen Repräsentation

Die im Kapitel 3 aufgeführten mathematischen Beziehungen der Diffusion sind für die Anfängerin schon deswegen ungeeignet, weil ihr die mathematischen Voraussetzungen noch nicht bekannt sind. Letztlich handelt es sich aber, wie schon im fachwissenschaftlichen Teil gezeigt, bei der Diffusion um ein Transportphänomen, das sehr einfach in eine qualitative Formulierung übertragen werden kann. Ich zeige deshalb diese Umsetzung nicht explizit, sondern füge sie direkt in die folgende Aufgabenlösung ein.

Von den drei Referenzlösungen ist die Erklärung der „Gasdiffusion“ durch Ton eine Ausnahme: Wie schon erwähnt bildet sie nämlich eine Lösung ab, die lernpsychologisch sinnvoll ist, fachwissenschaftlich aber nicht richtig. Um dieses besondere Vorgehen zu begründen, muss auf die nächsten Kapitel vorgegriffen werden. Wie sich auch empirisch zeigen wird, kann die einfache lernpsychologisch motivierte Lösung dieser Erklärungsaufgabe als ein geeigneter Einstieg in das Teilchenmodell verwendet werden, weil in ihr der einfache Grössenunterschied der Teilchen entscheidend für eine einfache Erklärung mit dem Teilchenmodell ist. Die fachwissenschaftlich richtige - kinetische - Erklärung ist demgegenüber für Anfängerinnen und Anfänger sicherlich zu schwierig. Weil in dieser Arbeit ohnehin die Auffassung vertreten wird, dass die Lernenden in erster Linie die permanente Anpassung ihrer (sowieso überwiegenden falschen) Modellvorstellungen erlernen müssen, erscheint die Verwendung einer fachlich nicht richtigen, aber lernpsychologisch geeigneten Erklärung vertretbar.

Die jetzt folgende Referenzlösung hat - wie schon erwähnt - nicht den Anspruch, eine psychologisch valide Abbildung der Problemlöseaktivitäten zu sein. Ihre Funktion ist lediglich, das zur Lösung notwendige Wissen in einer formalisierten Lösung (als deklarativer Prolog-Code) zusammenzutragen und mit einem möglichst einfachen Lösungsplan das Lernproblem zu lösen. Damit dient die Referenzlösung dazu, das notwendige Wissen explizit darzustellen und zu strukturieren. Richtige und falsche Lösungsansätze von Schülerinnen können auf dieser „Blaupause“ betrachtet und analysiert werden. Im Text werden die wichtigen Wissensaspekte und Planschritte beschrieben, anschließend werden jeweils die entsprechenden zentralen Teile des Prolog-Codes aufgeführt. Im Prolog-Code sind Variablen (beginnen mit Grossbuchstaben) wegen der besseren Lesbarkeit durch die Variablenwerte des Experiments ersetzt, wenn nicht allgemeine Gesetzmäßigkeiten betroffen sind, die z.B. für beide Gase Wasserstoff und Stickstoff oder mehrere Feststoffe gleichermaßen gelten.

Für diese nicht numerische Formulierung der „Gasdiffusion“ werden für Variablenwerte Kategorien ähnlich denen der qualitativen Physik benutzt:Größenvergleiche werden als größer, gleich oder kleiner erfasst, Änderungen als wachsend, konstant oder fallend beschrieben.

Für eine korrekte Lösung der Aufgabe wurde das allgemeine Schema der Abbildung 5.1 folgendermaßen umgesetzt:

1. Die Veränderung der Gasarten (Wasserstoff und Stickstoff, unabhängige Variable) und das Auftreten von Gasblasen (aus Wasserstoff und Stickstoff, abhängige Variable) werden erkannt.
2. Wasserstoff und Stickstoff werden als 2 Teilchensysteme mit unterschiedlichen Teilcheneigenschaften und das Auf- bzw. Nichtauftreten der Gasblasen als Auftreten und Abwesenheit der entsprechenden Teilchensystemen auf die Modellebene abgebildet.
3. Es wird eine Erklärung für das Auftreten von Wasserstoff und das Nichtauftreten von Stickstoff im Wasserbad generiert, die auf den Unterschied der Teilchensysteme von Wasserstoff und Stickstoff zurückführt.
4. Dabei wird eine Reihe von Voraussetzungen auf der Modellebene (teilweise abgeleitet von der makroskopischen Ebene) berücksichtigt, die für die Erklärung nötig sind.

Im folgenden wird also für die Erklärung der „Diffusion“ von Gasen durch Ton nach dem lernpsychologisch plausiblen (aber fachlich inkorrektem) Lösungsmodell schrittweise vom Allgemeinerem zum Speziellen eine Musterlösung vorgestellt.

Die Erklärungsaufgabe kann folgendermaßen gelöst werden (Zunächst folgt der Prolog-Code des allgemeinen Lösungsplans):

```
explain(gas_diffusion_through_clay):-
experiment(1->4,gas_diffusion_through_clay,type(hypothesis_of_correlation)),
explain_experiment_of_type(Period,gas_diffusion_through_clay,type(hypothesis_of_correlation)).
```

In dieser PROLOG-Klausel werden also zuerst die allgemeinen Merkmale der Modellerklärung eines Experiments festgelegt. In der ersten Bedingung der PROLOG-Klausel (nach dem Zeichen „:-“, das die Unterbedingungen angekündigt, die zur Geltung der Klausel gegeben sein müssen) wird festgelegt, dass das Experiment der „Gasdiffusion“ durch Ton ein Experiment ist mit einer Hypothese über einen Zusammenhang (zwischen unabhängiger und abhängiger Variable).

1. Mit der ersten Bedingung wird festgelegt, was unter einem Experiment verstanden wird:

```
experiment(1->4,gas_diffusion_through_clay,type(hypothesis_of_correlation)):-
investigated_relationsship(1->4, gas_diffusion_through_clay, used_type_of_gas, gas_bubbles)
experimental_conditions(1->4,gas_diffusion_through_clay),
experiment(1->2,hydrogen_diffusion_through_clay),
intended_action(2->3,change_of_gas([substance(hydrogen),substance(nitrogen)],experimenter)),
experiment(3->4,nitrogen_diffusion_through_clay),
observed(Instants, gas_bubbles).
```

Die einzelnen Unterbedingungen dafür, dass dieser Versuch ein Experiment mit einer Zusammenhangshypothese ist, sind also in dieser Formulierung:

1. dass eine Beziehung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable untersucht wird.

```
investigated_relationsship(1->4, gas_diffusion_through_clay, used_type_of_gas, gas_bubbles).
```

2. dass einige praktische Bedingungen (Beschreibung des Versuchsaufbaus) für dieses Experiment gegeben sein müssen, die aus den PROLOG-Fakten hervorgehen. Diese praktischen Bedingungen werden hier als bekannt vorausgesetzt (sind also die oben erwähnten basalen Gegebenheiten).

```
experimental_conditions(1->4,gas_diffusion_through_clay):-
given(1->4,gas_cylinder(substance(hydrogen))),
given(1->4,gas_cylinder(substance(nitrogen))),
given(1->4,clay_cylinder),
given(1->4,point_downward(opening(clay_cylinder))),
given(1->4,closed(opening(clay_cylinder),rubber_stopper_with_hole)),
given(1->4,glas_beaker),
given(1->4,point_downward(opening(glas_beaker))),
given(1->4,under(clay_cylinder,glas_beaker),
given(1->4,glas_tube),
given(1->4,put(glas_tube,rubber_stopper_with_hole)),
given(1->4,waterbath),
given(1->4,lead(glas_tube,rubber_stopper_with_hole,waterbath)),
given(1->4,rubber_tube),
given(1->4,lead(rubber_tube,gas_cylinder,glas_beaker)).
```

3. dass die unabhängige Variable manipuliert wird. Hier wird wieder als bekannte Gegenheit vorausgesetzt, dass Wasserstoff und Stickstoff als die Ausprägungen der unabhängigen Variable Art des eingesetzten Gases bekannt sind und dass die Gase tatsächlich in die experimentelle Apparatur eingeleitet werden können.

```
manipulated(1->4,used_type_of_gas([substance(hydrogen),substance(nitrogen)]):-
values([substance(hydrogen),substance(nitrogen)])),
given(1->4,gas_cylinder(substance(hydrogen))),
given(1->4,gas_cylinder(substance(nitrogen))),
intended_action(2->3,change_of_gas([substance(hydrogen),substance(nitrogen)],
experimenter)),
given(1->2,connected_to_apparatus(gas_cylinder(substance(hydrogen)))),
given(3->4,connected_to_apparatus(gas_cylinder(substance(nitrogen)))).
```

4. dass in diesem Versuch eine identische Prozedur nacheinander mit zwei verschiedenen Gasen durchgeführt wird.

```
intended_action(2->3, change_of_gas([substance(hydrogen),
substance(nitrogen)], experimenter)).
```

5. dass die Veränderung der abhängigen Variable beobachtet, d.h. im Fall der kategorialen Variable Auftreten bzw. Nichtauftreten von Gasblasen gemessen wird:

```
observed(Instants, gas_bubbles):-
observed(2, substance(hydrogen), gas_bubbles(substance(hydrogen), waterbath)),
observed(4, substance(nitrogen), no_gas_bubbles(substance(nitrogen), waterbath)).
```

2. Die Programmklause, die zur Geltung der zweiten Unterbedingung (`explain_experiment_of_type`) erfüllt sein muss, umfasst auf der nächstniedrigeren Ebene, wie im jetzt folgenden Programmcode gezeigt wird, die genauere Anwendung der Erklärung eines Experiments:

```
explain_experiment_of_type(Period, Experiment, type(hypothesis_of_correlation)):-
change_of_independent_variable(1->4,
gasdiffusionthroughclay, used_type_of_gas([substance(hydrogen),
substance(nitrogen)]), categorychange),
model_relation(1->4, used_type_of_gas([substance(hydrogen), substance(nitrogen)]),
particle_system([hydrogen, nitrogen]), parallel) change_of_dependent_variable(1->4,
gasdiffusionthroughclay, gas_bubbles([substance(hydrogen), substance(nitrogen)], waterbath),
categorychange) ,
model_relation(1->4, gas_bubbles([substance(hydrogen), substance(nitrogen)], waterbath),
particle_system([hydrogen, nitrogen]), parallel),
submicroscopic_explanation(1->4, particle_system([hydrogen, nitrogen]), categorychange,
particle_system([hydrogen, nitrogen]), categorychange).
```

1. Bestimmung von unabhängiger und abhängiger Variable sowie ihrer qualitativen Veränderungen im Experiment, die Modellrelationen beider Variablen sowie eine Erklärung der Veränderung der abhängigen Modellvariable durch die unabhängige Modellvariable.

```
change_of_independent_variable(1->4, gasdiffusionthroughclay, usedtypeofgas):-
investigated_relationsship(1->4, gasdiffusionthroughclay, usedtypeofgas,
gasbubbles)ance(nitrogen)], waterbath)),
measurable(1->4, usedtypeofgas),
manipulated(1->4, usedtypeofgas, values([substance(hydrogen), substance(nitrogen)])),
qualitative_change(1->4, values([substance(hydrogen), substance(nitrogen)])).
```

2. Nach der Erfüllung der Bedingungen für das konkrete Experiment werden in der zweite Gruppe von Klauseln folgende Bedingungen für eine erfolgreiche Erklärung der Veränderung der abhängigen Variablen festgelegt:

1. Die beiden Werte der unabhängigen Variable Lufttemperatur im Kolbenprober, müssen vorliegen.

```
change_of_independent_variable(1->4, gas_diffusion_through_clay, used_type_of_gas):-
investigated_relationsship(1->4, gas_diffusion_through_clay, used_type_of_gas,
gas_bubbles)ance(nitrogen)], waterbath)),
measurable(1->4, used_type_of_gas),
manipulated(1->4, used_type_of_gas, values([substance(hydrogen), substance(nitrogen)]))
qualitative_change(1->4, values([substance(hydrogen), substance(nitrogen)])).
```

2. Die Modellrelation (parallele Entsprechung) zwischen der unabhängigen Variablen Gastyp bzw. ihren beiden Werten und deren Entsprechungen auf der Modellseite (Partikelsystem des Gastyps) muss gefunden werden. Dafür muss für jedes Gas die grundlegende Modellrelation zwischen der makroskopischen Substanz und dem submikroskopischen Partikelsystem auf der Modellseite bekannt sein:

```
model_relation(1->4, used_type_of_gas, type_of_particle_system, parallel):-
model_relation(1->4, substance(hydrogen), particle_system(hydrogen), parallel),
model_relation(1->4, substance(nitrogen), particle_system(nitrogen), parallel).
model_relation(1->4, substance(hydrogen), particle_system(hydrogen), parallel):-
submicroscopic_explanation_model(1->4, particle_system(hydrogen),
substance(hydrogen)),
particle_system(1->4, substance(hydrogen)) ,
```

```
given(1->4, substance(hydrogen), inside_apparatus),
is_matter(T, substance(hydrogen)).
```

3. Für jedes Gas muss bekannt sein, dass das Teilchenmodell ein erklärendes submikroskopisches Modell ist:

```
submicroscopic_particle_explanation_model(1->4, particle_system(hydrogen),
substance(hydrogen)) :-
general_model(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)),
explanation_model(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)),
submicroscopic_particle_model(1->4, particle_system(hydrogen),
substance(hydrogen)).
```

Es hat die generellen Eigenschaften eines Modell, d.h. es bildet Objekte und Relationen eines Originalbereichs mit Modellrelationen in einen Modellbereich ab, wobei immer nur ein Teil der Originaleigenschaften und Relationen berücksichtigt wird. Die Abbildungen sind darüberhinaus pragmatisch beeinflusst, d.h. sie hängen vom Zweck des Modells ab, vom Benutzer und von der Situation, in der das Modell benutzt wird.

```
general_model(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)):-
maps(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)),
reduced_mapping(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen) ),
pragmatic_mapping(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)).
```

```
pragmatic_mapping(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)):-
model_purpose(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen),
used_by(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen), student),
situation(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen), [chemistry_lesson])).
```

Weiter ist das Teilchenmodell ein Erklärungs- und Prognosemodell. Damit es Erklärung und Prognose leisten kann, müssen die Modellrelationen eindeutig sein, d.h. sowohl in Erklärungs- als auch in Prognoserichtung darf mit jedem Objekt und jeder Relation jeweils nur genau ein Pendant des anderen Bereichs durch eine Modellrelation verbunden sein.

```
explanation_model(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)):-
one_to_one_mapping(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)).
```

Schließlich ist das Teilchenmodell ein diskontinuierliches submikroskopisches Modell, dass ausschließlich aus unsichtbar kleinen Teilchen besteht (d.h. zwischen ihnen existiert ein Vakuum).

```
submicroscopic_particle_model(1->4, particle_system(hydrogen), substance(hydrogen)):-
particle_system(1->4, hydrogen),
discontinuous(1->4, particle_system(hydrogen)),
invisible_with_microscope(1->4, particle_system(hydrogen)).
```

Die konkrete Modellrelation besteht hier daraus, dass dem Gas Wasserstoff ein Teilchensystem von Wasserstoffpartikeln und der Substanz Stickstoff ein Teilchensystem von Stickstoffpartikeln zugewiesen wird (s. Prolog-Code unter 2.(b)).

Die Werte der abhängigen Variable, d.h. das Auftreten (oder Nichtauftreten) von Gasblasen im Wasserbad müssen analog zu den Werten der unabhängigen Variablen bestimmt werden.

```
change_of_dependent_variable(1->4, gas_diffusion_through_clay, gas_bubbles, [gas_bubbles(substance(hydrogen), waterbath, yes),
gas_bubbles(substance(nitrogen), waterbath, no)]),
investigated_relationship(1->4, gas_diffusion_through_clay, used_type_of_gas,
gas_bubbles),
measurable(1->4, gas_bubbles),
value_of_qualitative_macroscopic_change(1->4,
gas_bubbles, values([gas_bubbles(substance(hydrogen), waterbath, yes),
gas_bubbles(substance(nitrogen), waterbath, no)]))).
```

Ähnlich (b) wird die Modellrelation zur abhängigen Variablen bestimmt. Auch hier wird das Wissen darüber vorausgesetzt, dass Wasserstoff- und Stickstoffblasen im Wasserbad Teilchensystemen von Wasserstoff und Sauerstoff entsprechen.

```
model_relation(1->4, gas_bubbles([substance(hydrogen), substance(nitrogen)],
waterbath), particle_system([hydrogen, nitrogen]), increasing_monotonic):-
```

```

given(1->2, connected_to_apparatus(gas_cylinder(substance(hydrogen)))),
given(3->4, connected_to_apparatus(gas_cylinder(substance(nitrogen)))),
end_of(2, 1->2),
observed(2, hydrogen, gas_bubbles(substance(hydrogen), waterbath)),
end_of(4, 3->4).
observed(4, nitrogen, no_gas_bubbles(substance(nitrogen), waterbath)),
model_relation(1->4, substance(hydrogen), particle_system(hydrogen), parallel),
model_relation(1->4, substance(nitrogen), particle_system(nitrogen), parallel).

```

Im letzten Schritt wird eine Erklärung für die Veränderung der abhängigen Variablen gesucht, die auf die Veränderung der unabhängigen Variablen zurückgehen. Da das Auftreten (bzw. Nichtauftreten) der Wasserstoffteilchen im Wasserbad wird durch ihren Transport bzw. Nichttransport aus der Glasflasche zum Wasserbad erklärt. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Bedingungen ist, dass der Ton für Wasserstoffpartikel durchlässig, für Stickstoffpartikel aber undurchlässig ist.

```

submicroscopic_explanation(1->4, type_of_particle_system,type_of_particle_system, [substance(hydrogen),
substance(nitrogen)]):-
transport_of_particles(1->4Period, particles(hydrogen),
particle_lattice(steel,gas_cylinder),
particle_system(water,waterbath)),
no_transport_of_particles(1->4Period, particles(nitrogen),
particle_lattice(steel,gas_cylinder), particle_system(water,waterbath)).
transport_of_particles(1->4,particles(hydrogen),particle_lattice(steel,gas_cylinder),
particle_system(water,waterbath)):-
experimental_conditions(1->4,gas_diffusion_through_clay),
permanent(1->4,move(particle(Gas))),
elastic(1->4,collision(particle(Gas),particle(steel))),
elastic(1->4,collision(particle(Gas),particle(glas))),
elastic(1->4,collision(particle(Gas),particle(rubber))),
elastic(1->4,collision(particle(Gas),particle(clay))),
impenetrable(1->4,particle_lattice(steel),particle(hydrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(rubber),particle(hydrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(rubber),particle(hydrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(glas),particle(hydrogen)),
penetrable(1->4,particle_system(water),particle(hydrogen)),
penetrable(1->4,particle_lattice(clay),particle(hydrogen)).

no_transport_of_particles(1-4,particles(nitrogen),particle_lattice(steel,gas_cylinder),
particle_system(water,waterbath)):-
experimental_conditions(1->4,gas_diffusion_through_clay),
permanent(1->4,move(particle(nitrogen))),
elastic(1->4,collision(particle(nitrogen),particle(steel))),
elastic(1->4,collision(particle(nitrogen),particle(glas))),
elastic(1->4,collision(particle(nitrogen),particle(rubber))),
elastic(1->4,collision(particle(nitrogen),particle(clay))),
impenetrable(1->4,particle_lattice(steel),particle(nitrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(rubber),particle(nitrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(rubber),particle(nitrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(glas),particle(nitrogen)),
penetrable(1->4,particle_system(water),particle(nitrogen)),
impenetrable(1->4,particle_lattice(clay),particle(nitrogen)).

```

Um diesen Unterschied aber als den entscheidenden zu isolieren, müssen eine Reihe von Rahmenbedingungen gewusst werden.

1. Der Versuchsaufbau.

Zunächst einmal muss der Versuchsaufbau bekannt sein, weil der Transport der Teilchensystem durch diese spezifische Anordnung geleitet wird (Prolog-Code unter 1(b)).

2. die ständige Bewegung aller Gasteilchen.

```

permanent(T,move(particle(Substance))):-
move(T,particle(Substance)),
frictionless(T,movement(particle(Substance))).

```

3. Zwischen Stahl-, Glas-, Gummi- und Tonteilchen existieren so starke Anziehungskräfte, dass diese Teilchen in Partikelgittern mit fester Teilchenanordnung angeordnet sind.

4. Die Gasteilchen erleiden mit Stahl-, Glas-, Gummi- und Tonteilchen elastische Kollisionen.

5. Der Stahl der Gasflasche, das Glas der diversen Rohre und Becher, sowie das Gummi der Stopfens bestehen aus Teilchengittern, durch die (fast) keines der beiden Gasteilchensorten dringen kann (s. den Prolog-Code unter 2(f)). Die Teilchengitter (Glas, Stahl, Ton, Gummi) werden durch Anziehungskräfte zwischen den Teilchen in ihrer Form gehalten (Wasser ist hingegen für Teilchen durchdringlich).

```
impenetrable(T,particle_lattice(Substance),particle(Gas)):-
particle_lattice(T,Substance),
smaller(T,volume(between_particles(Substance)),volume(particle(Gas))),
impenetrable(T,particle(Substance)),
impenetrable(T,particle(Gas)).

particle_lattice(T,Substance):-
far_order_structure(T,particle_system(Substance)).
far_order_structure(T,particle_system(Substance)):-
particle_system(T,Substance),
attraction_forces(T,particle_system(Substance)),
greater_than(T,negative_potential_energy(particle_system(Substance)), kinetic_energy(particle_system(Substance))).
```

6. Lediglich das Teilchengitter des Tons weist Lücken aus, die grösser als der Durchmesser des Wasserstoffteilchens, aber kleiner als der des Stickstoffteilchens ist.

```
impenetrable(T,particle_lattice(clay),particle(nitrogen)):-
particle_lattice(T,clay),
smaller(T,volume(between_particles(clay)),volume(particle(nitrogen))),
impenetrable(T,particle(clay)),
impenetrable(T,particle(nitrogen)).
penetrable(T,particle_lattice(clay),particle(hydrogen)):-
particle_lattice(T,clay),
greater(T,volume(between_particles(clay)),volume(particle(hydrogen))),
impenetrable(T,particle(clay)),
impenetrable(T,particle(hydrogen)).
```

6.3 Aufgabenanalyse der zweiten Aufgabe: Die Brownsche Bewegung von Rauchteilchen in Luft

6.3.1 Referenzlösung der Brownschen Bewegung in qualitativ-wissenschaftlicher Repräsentation

Wie gezeigt, kann auch die Brownsche Bewegung als Spezialfall eines Transportphänomens verstanden und erklärt werden. Deshalb ist auch hier die Umsetzung der numerischen in eine qualitative Lösung unproblematisch und wird in die folgende Referenzlösung integriert (zur Erklärung des Unterschieds zwischen numerischen und qualitativen Darstellungen s. z.B. Plötzner, 1994 oder 1997).

Während die „Gasdiffusion“ durch Ton ein klassisches Experiment mit einer Zusammenhangshypothese von unabhängiger und abhängiger Variable darstellt, handelt es sich bei der Brownschen Bewegung um eine singuläre Beobachtung: Zu einem bestimmten Zeitpunkt wird lediglich eine Variable fokussiert, nämlich die Bewegung der Rauchteilchen unter dem Mikroskop. Deshalb bedeutet die Lösung dieses Lernproblems lediglich, dass die Referenzlösung dazu die Modellvariable (plus den entsprechenden Werten) finden muss, die dem Zittern der Rauchteilchen entspricht. Da diese Modellrelation wiederum von anderen Zusammenhängen im Modellbereich abhängt (also auf die Grundannahmen des Teilchenmodells zurückgeführt wird), liefert die Referenzlösung eine Erklärung des Zitterns der Rauchteilchen durch grundlegende Annahmen des Modells im Rahmen der Gegebenheiten des Experiments.

```
explain(brownian_movement):-
experiment(Period,Experiment,typ(single_observation)),
explain_experiment_of_type(1,brownian_movement,type(single_observation)).
explain_experiment_of_type(1,brownian_movement,type(single_observation)) :-
observation(1, brownianmovement, shivering(cigarettesmoke)),
```

```
model_relation(1, shivering(cigarettesmoke), velocity_changes(particle_lattice(cigarettesmoke)), parallel).
```

Die Modellrelation zwischen dem beobachteten Zittern der Rauchpartikel und dem Geschwindigkeitswechsel (Geschwindigkeitswechsel ist hier als Vektorveränderung verstanden) setzt weiteres Wissen über die Modellebene und einiges Wissen um die experimentellen Bedingungen voraus, aus denen Folgerungen für die Modellebene gezogen werden können:

Zunächst einmal müssen die experimentellen Bedingungen vorausgesetzt werden (z.B. dass ein Lichtmikroskop vorhanden ist oder dass Luft und Rauch in der Rauchkammer vorhanden ist). Zweitens ist vorausgesetzt, dass es sich bei den beobachtbaren Rauchbröckchen auf Modellebene um Partikelgitter handelt. Weiter ist Bedingung der erwünschten ``korrekten'' Erklärung, dass Luftpartikel ein System aus praktisch voneinander unabhängigen Teilchen bilden und dass es (praktisch) keine Feldkräfte zwischen den Luftpartikeln und den Partikelgittern des Zigarettenrauchs gibt. Dann bleiben als Erklärung des Zitterns der Bröckchen die Kollisionen zwischen ihnen und den Luftpartikeln, die zu permanenten Geschwindigkeitsänderungen führen.

```
model_relation(Period, shivering(substance(cigarette_smoke)),
velocity_changes(particle_lattice(cigarette_smoke)), parallel):-
experimental_conditions(1, brownian_movement),
particle_lattice(1, substance(cigarette_smoke)),
given(1, contained(substance(air), smokecell)),
system_of_independent_particles(1, air),
no_field_forces(1, particle(air), particle(cigarette_smoke)),
collision(1, particles(air), particle_lattice(cigarette_smoke)).
experimental_conditions(1, brownianmovement):-
given(1, lightmicroscope),
given(1, smokecell),
given(1, illuminated(smokecell)),
given(1, mounted(smokecell, lightmicroscope)),
given(1, contained(air, smokecell)),
given(1, contained(cigarettesmoke, smokecell)).
```

Das Prolog-Prädikat dieser Klausel für die Bedingung des Vorliegens eines Partikelgitters ist weiter oben aufgeführt.

Damit Luft ein System aus unabhängigen Teilchen bilden kann, dürfen Luftteilchen weiter nicht in einer regelmäßigen Struktur angeordnet sein, d.h., dass es zwar Anziehungskräfte zwischen den Teilchen geben darf, jedoch die kinetische Energie des Teilchensystems größer als seine (negative) potentielle Energie sein muss.

```
system_of_independent_particles(1, air):-
no_regular_structure(1, particle_system(air)).

no_regular_structure(1, particle_system(air)):-
particle_system(1, air),
attraction_forces(1, particle_system(air)),
greater_than(_, kinetic_energy(particle_system(air)), negative_potential_energy(particle_system(air))).
```

Die vielen geschwindigkeitsverändernden Kollisionen der Rauchbröckchen mit den Luftpartikeln ereignen sich, wenn es viele Luftteilchen und zumindest ein Rauchbröckchen gibt, wenn Luftteilchen und Rauchbröckchen sich berühren und beide undurchdringlich sind:

```
collision(1, particles(air), particle_lattice(cigarette_smoke)):-
numerous(1, particle(air)),
touch(1, particle(air), particle(cigarette_smoke)),
impenetrable(1, particle(air)),
particle_lattice(1, cigarette_smoke),
impenetrable(1, particle(cigarette_smoke)).
```

Die andauernden Kollisionen (das makroskopische Zittern) sind möglich, wenn sich zumindest eines der beteiligten Teilchensorten andauernd bewegt.

```
touch(T, particle(air1), particle(cigarette_smoke)):-
particle_system(T, air1),
particle_system(T, cigarette_smoke),
or(permanent(T, move(particle(air))), permanent(T, move(particle(cigarette_smoke)))).
```

Permanente Bewegung ist möglich, wenn sie reibungsfrei ist.

```
permanent(T,move(particle(Substance))):-
move(T,particle(Substance)),
frictionless(T,movement(particle(Substance))).
```

Reibungsfreie Bewegung ist möglich, wenn sich zwischen den Teilchen ein Vakuum befindet.

```
frictionless(T,movement(particle(Substance))):-
move(T,particle(Substance)),
vacuum(T,space_between_particles(particle_system(Substance))).
```

6.4 Aufgabenanalyse der dritten Aufgabe: Thermische Expansion von Luft

Die quantitativen makroskopischen Aspekte der Gasexpansion wurden bereits in Abschnitt 3.3. beschrieben.

6.4.1 Referenzlösung der thermischen Expansion von Luft in einem Kolbenprober mittels einer qualitativ-wissenschaftlichen Repräsentation

Die thermische Gasexpansion ist das erste Experiment, dessen numerische Modelllösung eventuell in der Oberstufe des Gymnasiums behandelt werden könnte. Im Anfängerstadium erscheint jedoch auch hier eine nicht-numerische Lösung angemessen (weil sie von den drei Aufgaben die komplexeste darstellt).

Zunächst einmal wird deshalb eine qualitative Ableitung der quantitativen Beziehungen makroskopischen Gesetzmäßigkeiten des Gasverhaltens (siehe Kap.3) beschrieben. In dieser Formulierung wird nur mit den Relationen ``monoton fallend'' und ``monoton steigend'' argumentiert. Das van-der-Waals-Modell der realen Gase enthält zwar nicht-monotone Bereiche, allerdings liegen diese in Druck- und Temperaturbereichen, die weit von den Alltagsbedingungen eines Schullabors entfernt sind.

Zunächst sind folgende Beziehungen bekannt:

- Das Volumen *makroskopisch* steigt monoton mit der Stoffmenge *makroskopisch*
- Das Volumen *makroskopisch* fällt monoton mit dem Druck *makroskopisch*
- Das Volumen *makroskopisch* steigt monoton mit der Temperatur *makroskopisch*
- Keine weiteren Variablen, sondern nur die van-der-Waals Koeffizienten beeinflussen das Volumen. Die van-der-Waals Koeffizienten spielen aber nur im Bereich sehr hoher Drucke und sehr niedrigen Temperaturen eine Rolle. Deshalb können sie für die Standardbedingungen und ihre Umgebung vernachlässigt werden.

Also gilt:

$$V_{\text{makroskopisch}} \sim \frac{n_{\text{makroskopisch}} T_{\text{makroskopisch}}}{P_{\text{makroskopisch}}} \text{ bzw. } T_{\text{makroskopisch}} \sim \frac{P_{\text{makroskopisch}} V_{\text{makroskopisch}}}{n_{\text{makroskopisch}}}$$

Wenn folgende *eindeutigen* Modellbeziehungen akzeptiert werden:

- Das makroskopische Gasvolumen ist gleich dem submikroskopischen Volumen des Teilchensystems.
- Der makroskopische Gasdruck auf die Behälterwände ist gleich dem submikroskopischen Druck, den die Kollisionen der Partikel des submikroskopischen Systems auf die Behälterwände im Modell ausüben.

- Die makroskopische Gasmasse ist gleich der submikroskopischen Masse der Gasteilchen.

dann folgt aus

$$T_{\text{makroskopisch}} \sim \frac{P_{\text{makroskopisch}} V_{\text{makroskopisch}}}{n_{\text{makroskopisch}}}$$

und diesen drei Postulaten:

$$T_{\text{makroskopisch}} \sim \frac{P_{\text{makroskopisch}} V_{\text{makroskopisch}}}{n_{\text{submikroskopisch}}}$$

Und wenn weiterhin Folgendes über das Modell angenommen wird:

- Das Volumen der kleinsten Teilchen bleibt konstant.
- Das Volumen des Teilchensystems setzt aus dem Volumen der Teilchen und dem Volumen des Raumes zwischen den Teilchen zusammen.
- Die Masse der kleinsten Teilchen bleibt konstant.
- Die Teilchen befinden sich in andauernder Bewegung.
- Die Teilchen kollidieren miteinander und mit den Behälterwänden und üben dabei Kräfte (bzw. Druck) aufeinander bzw. auf die Behälterwand aus.
- Der submikroskopische Druck der kleinsten Teilchen ist proportional der Masse der Teilchen.
- Der submikroskopische Druck der kleinsten Teilchen ist proportional der Geschwindigkeit der kleinsten Teilchen,

dann folgt daraus, dass die makroskopische Temperatur der submikroskopischen Teilchenbewegung entspricht:

$$\text{Temperatur}_{\text{makroskopisch}} \sim \frac{\text{Geschwindigkeit}_{\text{submikroskopisch}} \cdot \text{Masse}_{\text{submikroskopisch}} \cdot (V(\text{Teilchen})_{\text{submikroskopisch}} + V(\text{Zwischenraum})_{\text{submikroskopisch}})}{n_{\text{submikroskopisch}}}$$

In diesem Ausdruck sind folgende Größen konstant und können deshalb wegfallen:

- Masse_{submikroskopisch}
- $V(\text{Teilchen})_{\text{submikroskopisch}}$
- $V(\text{Zwischenraum})_{\text{submikroskopisch}}$
- $n_{\text{submikroskopisch}}$

Eine Erhöhung der Temperatur muss sich daher in einer Erhöhung der Teilchengeschwindigkeit bemerkbar machen:

$$\text{Temperatur}_{\text{makroskopisch}} \sim \text{Geschwindigkeit}_{\text{submikroskopisch}}$$

Für eine korrekte Referenzlösung des Problems wird das allgemeine Schema aus Abschnitt 6.2 folgendermaßen umgesetzt:

1. Die Veränderung der makroskopischen Gastemperatur (Luft im Kolbenprober, unabhängige Variable) und die Veränderung des makroskopischen Gasvolumens (Luft im Kolbenprober, abhängige Variable) werden erkannt.
2. Die Gastemperatur wird als durchschnittliche kinetische Translationsenergie (d.h. hier: schnellere Bewegung) auf die Modellebene abgebildet, das Gasvolumen als Volumen des entsprechenden Partikelsystems.

3. Es wird eine Erklärung der Volumenänderung auf Modellebene generiert, die auf die schnellere Bewegung der Luftteilchen nach Temperaturerhöhung zurückgreift.
4. Dabei wird eine Reihe von Voraussetzungen auf der Modellebene (zum Teil notwendigerweise abgeleitet von der makroskopischen Ebene) berücksichtigt, die für die Erklärung nötig sind.

Das allgemeine Schema für die Modellerklärung von Experimenten, die Zusammenhangshypothesen überprüfen, entspricht dem von Lernaufgabe 1, der „Diffusion“ durch einen Tonzylinder. Die Aufgabe kann damit folgendermaßen gelöst werden:

1. Zunächst wird der Versuch der thermischen Gasexpansion in einem Kolbenprober als Experiment bestimmt.

```
experiment(1->2, thermalgasexpansion, type(hypothesis_of_correlation)) :-
investigated_relationsship(1->2, thermalgasexpansion, temperature(substance(air), inside_syringe),
volume(substance(air), inside_syringe)),
experimental_conditions(1->2, thermalgasexpansion).
```

Die Bedingungen für die thermische Gasexpansion (ein Experiment mit einer Zusammenhangshypothese zwischen Temperatur und Volumen) sind:

1. dass eine Beziehung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable untersucht wird.

```
investigated_relationsship(1->2, thermalgasexpansion, temperature(substance(air),
inside_syringe), volume(substance(air), inside_syringe)).
```

2. dass einige praktische Bedingungen (Beschreibung des Versuchsaufbaus) für dieses Experiment gegeben sein müssen.

```
experimental_conditions(1->2, thermalgasexpansion) :-
period(1->2) :- true.
given(1->2, syringe),
lab_syringe(1->2, syringe),
heatable(1->2, substance(air)),
given(1->2, substance(air), inside_syringe),
given(1->2, substance(air), environment),.
is_gas(1->2, substance(air)),
is_gas(1->2, substance(air)),
filled_with(1->2, syringe, substance(air)),
measurable(1->2, volume(substance(air), inside_syringe)),
measurable(1->2, temperature(substance(air), inside_syringe)),
measurable(1->2, pressure(substance(air), inside_syringe)).
```

3. dass die unabhängige Variable manipuliert wird.

```
manipulated(1->2, temperature(substance(air), inside_syringe),
values([293, 333])) :-
given(1->2, substance(air), inside_syringe),
is_gas(1->2, substance(air)),
experimentally_changed(1->2, temperature(substance(air), inside_syringe)),
beginning_of(1, 1->2),
measured(1, temperature(substance(air), inside_syringe), 293),
end_of(2, 1->2),
measured(2, temperature(substance(air), inside_syringe), 333).
```

2. In zweiten Klausur aus 3.5.3.

```
(explain_experiment_of_type(Period, gas_diffusion_through_clay,
type(hypothesis_of_correlation))).
```

werden die Bedingungen für die Erklärung der Beobachtung (bei Wasserstoff treten Gasblasen auf, bei Stickstoff hingegen nicht) festgelegt. Das sind folgende:

1. Die beiden Werte der unabhängigen Variable Gastemperatur, d.h. Wasserstoff zu Stickstoff (dazu muss die unabhängige Variable messbar sein und sie muss manipuliert worden sein) müssen vorliegen.
2. Die Modellrelation (parallele Entsprechung) zwischen der unabhängigen Variablen Gastyp und ihrer Entsprechung auf der Modellseite (durchschnittlicher Translationsenergie) muss gefunden

werden. Diese Modellrelation kann (wie in 3.7.3 gezeigt) aus einige Randbedingungen und den grundlegenden anderen Modellrelationen gefolgert werden:

```

model_relation(1->2, temperature(substance(air), inside_syringe),
average(translation_energy(particle_system(air), inside_syringe)),
increasing_monotonic) :-
model_relation(1->2, amount(substance(air), inside_syringe),
number(particles(particle_system(air), inside_syringe)), increasing_monotonic),
model_relation(1->2, volume(substance(air), inside_syringe), volume(particle_system(air),
inside_syringe), increasing_monotonic)
model_relation(1->2, mass(substance(air), inside_syringe),
mass(particle_system(air), inside_syringe), increasing_monotonic)
influence(T, volume(substance(Gas)), temperature(substance(Gas)), increasing_monotonic),
influence(T, amount(substance(Gas)), temperature(substance(Gas)), increasing_monotonic),
influence(T, pressure(substance(Gas)), temperature(substance(Gas)),
, increasing_monotonic ]),
influences(pressure(particle_system(Gas)),
influences(pressure(particle_system(Gas)),
general_assumption_for_model_relation_of_temperature(T, substance(Gas),
(volume(substance(Gas))), constant(amount(substance(Gas))),
constant(mass(substance(Gas))))].

```

Dabei müssen zum Schluss einige allgemeine Annahmen gemacht werden, damit die Annahme nicht für einen speziellen gültig ist: Sowohl das Volumen als auch die Menge des Gases müssen als konstant angenommen werden.

3. Genauso wie beim Versuch der Gasdiffusion müssen hier die allgemeinen Modellannahmen gelten

```

submicroscopic_particle_explanation_model(1->4, particle_system(air), substance(air)) :-
general_model(1->4, particle_system(air), substance(air)),
explanation_model(1->4, particle_system(air), substance(air)),
submicroscopic_particle_model(1->4, particle_system(air), substance(air)).

```

4. Die Werte der abhängigen Variable, Anfangs- und Endwert der Volumenänderung, müssen analog zu den Werten der unabhängigen Variablen bestimmt werden.

```

change_of_dependent_variable(1->2, thermalgasexpansion, volume(substance(air),
inside_syringe), increasing) :-
investigated_relationsship(1->2, thermalgasexpansion, temperature(substance(air),
inside_syringe), volume(substance(air), inside_syringe)),
measurable(1->2, volume(substance(air), inside_syringe)),
value_of_qualitative_macroscopic_change(1->2, volume(substance(air), inside_syringe),
values([0.05, 0.0609881])),
qualitative_change(1->2, values([0.05, 0.0609881]), increasing).

```

5. Ähnlich (b) wird die Modellrelation zur abhängigen Variablen bestimmt. Auch hier wird das Wissen darüber vorausgesetzt, dass Wasserstoff- und Stickstoffblasen im Wasserbad Teilchensystemen von Wasserstoff und Sauerstoff entsprechen.

```

model_relation(1->2, volume(substance(air), inside_syringe), volume(particle_system(air),
inside_syringe), increasing_monotonic) :-
model_relation(1->2, amount(substance(air), inside_syringe),
number(particles(particle_system(air), inside_syringe)), increasing_monotonic),
has_volume(T, substance(air)),
has_volume(T, particle_system(air)).

```

6. Im letzten Schritt wird eine Erklärung für die Veränderung der abhängigen Variablen gesucht, die auf die Veränderung der unabhängigen Variablen zurückgehen. Die Volumenänderung wird auf die erhöhte Teilchengeschwindigkeit nach der experimentellen Manipulation zurückgeführt:

```

submicroscopic_explanation(1->2, volume(particle_system(air), inside_syringe), increasing,
average(translation_energy(particle_system(air), inside_syringe)), increasing) :-
filled_with(1->2, lab_syringe, substance(air)),
model_relation(1->2, lab_syringe, tight(particle_lattice(piston(glas),
syringe_body(glas))), parallel),
system_of_independent_particles(1->2, air),
constant(1->2, pressure(particle_system(air), inside_syringe)),
constant(Period, number_of_particles(particle_system(air), inside_syringe)),
pushed_out(1->2, particle_lattice(piston(glas)), particles(air)).

```

7. Dafür müssen eine Reihe von Rahmenbedingungen erfüllt sein:

1. Die Luft muss in einem Kolbenprober enthalten sein und dieser muss auf Modellseite durch ein entsprechendes Teilchengitter aus Glasteilchen dargestellt sein:

```
filled_with(1->2,lab_syringe,substance(air)),model_relation(1->2,
lab_syringe,tight(particle_lattice(piston(glas),syringe_body(glas))),parallel).
```

2. Das Teilchensystem der Luft muss aus unabhängigen Teilchen bestehen. Das bedingt, dass es keine regelmässige Struktur besitzt. Und dies wiederum ist dann gegeben, wenn es zwar Anziehungskräfte zwischen den Teilchen gibt, der Wert der kinetischen Translationsenergie aber größer ist als der negative Wert der potentiellen Energie (der durch die Anziehungskräfte verursacht wird):

```
system_of_independent_particles(1->2, air) :-
no_regular_structure(1->2, particle_system(air)) ,
particle_system(1->2, air),
attraction_forces(1->2, particle_system(air)),
greater_than(_G16820, kinetic_energy(particle_system(air))),
negative_potential_energy(particle_system(air)).
```

3. Weiterhin muss der Druck, der durch das Teilchensystem der Luft auf den Kolben des Kolbenprobers ausgeübt wird, über das Experiment hin konstant sein (durch die Verwendung eines Kolbenprobers gesichert, wobei die Bewegungsreibung des Kolbens bei Null liegen soll).

```
constant(1->2,pressure(particle_system(air),inside_syringe)), constant(Period,number_of_particles(particle_system(air)),
```

Die entscheidende Bedingung, ist, dass das Partikelgitter des Kolbens durch die Luftteilchen während des Versuchs aus dem Zylinder des Kolbenprobers getrieben wird.

```
pushed_out(1->2,particle_lattice(piston(glas)),particles(air)):-
given(1->2,substance(air),environment),
model_relation(1->2,substance(air),particle_system(air),parallel),
collision(1->2,particle(air),particle_lattice(glas)),
collision(1->2,particle(air),particle_lattice(glas)),
beginning_of(Instant1,1->2),
equal(Instant1,pressure(particle_system(air),inside_syringe),
pressure(particle_system(air),outside_syringe)),
or(increase(1->2,force(collision(particle_system(air),inside_syringe),
particle_lattice(glas))),
increase(1-2,number(collision(particle(air),inside_syringe),particle_lattice(glas))))),
constant(1->2,force(collision(particle_system(air),outside_syringe),
particle_lattice(glas))),
end_of(Instant2,1->2),
equal(Instant2, pressure(particle_system(air),inside_syringe),
pressure(particle_system(air),outside_syringe)).
```

Die ersten fünf Klausen formulieren nur Randbedingungen, die sechste Klausen ist hingegen (für Anfängerinnen) nicht selbstverständlich: Sie fordert, dass sich zu Beginn des Experiments ein Kräftegleichgewicht zwischen dem Druck des Teilchensystems von innen und dem des Teilchensystems von außen auf das Festkörpergitter einstellt. Die siebte Klausen beschreibt, dass sich während der Erwärmung der Druck von innen auf den Kolbenprober ändert. Nach der Erwärmung (der Kolben ist wieder in Ruhe), muss wiederum der Druck von innen und außen gleich sein. Die Erklärung dieser Bedingungen sind relativ umfangreich:

Der Druck ist deshalb gleich, die Luftteilchen von innen und von außen mit gleicher Kraft auf das Teilchengitter der Teile des Kolbenproberstreifen:

```
equal(T, inside_syringe(particle_system(air),inside_syringe),
pressure(particle_system(air),outside_syringe)):-
filled_with(T,Container,substance(air)),
lab_syringe(T,Container),
given(T,substance(air),environment),
material(T,Container,substance(Substance)),
push(T,particle(air), particle_lattice(Substance),inside_syringe),
push(T,particle(air),particle_lattice(Substance),outside_syringe),
equal(T, force(collision(particle_system(air),inside_syringe)), force(collision(particle_system(air),outside_syringe))).
```

Diese Kräfte wiederum können unter mehreren Umständen gleich sein: Entweder liegen innen und außen gleiche Teilchendichten und -geschwindigkeiten vor (zu Anfang des Versuchs), oder (wie zum Schluss des Versuchs) gibt es auf einer Seite zwar eine höhere Teilchengeschwindigkeit, dafür aber eine niedrigere Teilchendichte:

```
equal(T, force(collision(particle_system(air),inside_syringe)), force(collision(particle_system(air),outside_syringe))):
```

```
filled_with(T,Container,substance(air)), lab_syringe(T,Container),
or((equal(T, particle_density(particle_system(air),inside_syringe),
particle_density(particle_system(air),outside_syringe)),
equal(T, average(translation_energy(particle_system(air),inside_syringe)),
average(translation_energy(particle_system(air),outside_syringe)))),
or((greater(T, particle_density(particle_system(air),inside_syringe),
particle_density(particle_system(air),outside_syringe)),
greater(T, average(translation_energy(particle_system(air),outside_syringe)),
average(translation_energy(particle_system(air),inside_syringe))),
constant(T,volume(particle_system(air)),inside_syringe)),
(greater(T, particle_density(particle_system(air),outside_syringe),
particle_density(particle_system(air),inside_syringe)),
greater(T, average(translation_energy(particle_system(air),inside_syringe)),
average(translation_energy(particle_system(air),outside_syringe))),
constant(T,volume(particle_system(air)),inside_syringe))).
```

Veränderungen der Teilchendichte werden erklärt, indem zunächst eine monoton wachsende Modellbeziehung zwischen der Teilchendichte und der Gasdichte angenommen wird und danach die experimentelle Beobachtung hinzugezogen wird (Volumenzuwachs bei Temperaturerhöhung). Da kein Gas im Kolbenprober verloren geht, ist die Teilchendichte im Kolbenprober nach dem Versuch kleiner als außerhalb des Kolbenprobers. Veränderungen der Teilchengeschwindigkeiten werden aus der Modellrelation zwischen Temperatur und Teilchengeschwindigkeit, sowie der Temperaturänderung gefolgert.

6.5 Diskussion der Ergebnisse der Aufgabenanalyse

Die Beschränkung dieser Aufgabenanalyse liegt darin, dass sie die ausgewählten Erklärungsaufgaben löst, indem sie die Aufgaben mittels geschachtelter Erklärungen bis auf die Lernvorgaben zum Teilchenmodell der durchschnittlichen Lehrpläne zurückführt und dabei für eine konsistente und detaillierte Erklärungen eine Reihe von Voraussetzungen offen legt, die in den Lehrplänen meist nicht bedacht werden. Auf diese Weise kann diese Aufgabenanalyse z.B. zeigen, auf welche Art genau die Brownsche Bewegung durch das Teilchenmodell erklärt werden kann und inwieweit Voraussetzungen der klassischen Mechanik gemacht werden müssen. Löffler (1992) oder Dahlmann (1996) sind in phänomenologisch orientierten Analysen zu ähnlichen Ergebnisse gekommen. Es bleibt zu überlegen, ob die strenge Methodik einer solchen Aufgabenanalyse auch im Rahmen anderer Unterrichtsansätze (z.B. dem von Mikelskis-Seiffert, 2002 oder Buck (2004) anwendbar ist. Die Ergebnisse der Aufgabenanalyse legen nahe, dass im Unterricht viele der Aspekte, die laut der Aufgabenanalyse eigentlich einbezogen werden müssten, wegen der zu hohen Komplexität eines solchen Anfangsmodells zunächst weggelassen werden sollten (was im durchschnittlichen Unterricht wohl auch geschieht). Ein einfaches Anfangsmodell würde aber sehr schnell modifiziert werden müssen, um Fragen z.B. nach der Teilchenbeschaffenheit der experimentellen Apparatur oder nach der Erklärung anderer Phänomene genügen zu können (daneben müssen Schülerinnen auch individuell ihre aus der Alltagswelt übertragenen mentalen Modelle korrigieren), weil die „korrekten“ Anfangsmodelle der Aufgabenanalyse sonst zu komplex werden. Bis jetzt hatten die Anfängerinnen im chemischen Unterricht meist mit scheinbar fixierten Lerninhalten zu tun. Von jetzt an sollen sie also bereits eingeführte Erklärungsmodelle immer wieder verändern, wenn sie mit anderen oder neuen empirischen Fakten nicht übereinstimmen. Schülerinnen müssten also ab jetzt in der Lage sein, Erklärungsmodelle zu modifizieren. Um diese Fähigkeit zu stützen, sollten sie bei der ers-

ten nötigen Modifikation erkennen, dass das Modellwissen über Partikel folgende grundlegenden Eigenschaften hat:

- Es ist eine erste Vorstellung vom Aufbau der Stoffe, die von den jeweils bekannten Beobachtungen und Modellrelationen abhängig ist. Vielleicht könnte man ganz andere Modelle vom Stoffaufbau entwickeln, die auch mit unseren Erfahrungen übereinstimmen würden. (Da man das Teilchenmodell auch mit optischen Hilfsmitteln nicht „sehen“ kann und die Veranschaulichung mit anderen Mitteln (z.B. Raster-Tunnel-Mikroskop) immer schon zur Dateninterpretation die Partikelannahme voraussetzt, eignet sich das Teilchenmodell der Stoffe dazu, diesen hypothetischen Charakter eines Erklärungsmodells zu verdeutlichen.)
- Wenn das hypothetische Teilchenmodell nicht ausreicht, um ein Stoffverhalten zu erklären, dann kann es verbessert werden. Allerdings sollte das neue Modell nach Möglichkeit all das ebenfalls erklären können, was bereits mit dem alten Modell schon erfasst wurde.

6.5.1 Verhältnis der Teilchenmodellsimulation zum van-der-Waals-Modell der Gase der Aufgabenanalyse

Die prädikatenlogische Darstellung der Aufgabenlösung in der Aufgabenanalyse erfasst das makroskopische Verhalten eines Stoffes, verbindet es mit dem aggregierten Verhalten eines Teilchensystems und führt dieses mit einfachen Annahmen auf die Eigenschaften der einzelnen Teilchen zurück (sie müsste für eine wissenschaftliche begründetere Zurückführung des Systemverhaltens auf die Eigenschaften der einzelnen Teilchen mit Methoden der statistischen Physik arbeiten, die in der Schule eine völlige Überforderung darstellen würden und in den Lehrplänen dementsprechend nicht erwähnt werden). Für jedes makroskopische Lernproblem kann somit entsprechend den Annahmen der Aufgabenanalyse Art und Komplexität des benötigten Teilchensystems und der es bestimmenden einzelnen Teilchen bestimmt werden, die zur Erklärung des makroskopischen Lernproblems nötig sind. Die Konstruktion eines Teilchensystems zur Erklärung eines makroskopischen Phänomens mit der Teilchenvorstellung in der Konstruktionsumgebung kann prinzipiell nach den Ergebnissen der entsprechenden Aufgabenanalyse vorgenommen werden. Allerdings sind einige der durch die Aufgabenanalyse explizit aufgeführten Erklärungen in der Simulation nicht in der Konstruktion explizit nachvollzogen werden (z.B. wird der feste Aggregatzustand der Apparatur in der Simulation einfach durch Gitterelemente vorgegeben, deren Struktur nicht durch die Eigenschaften von Attraktionskräften zwischen den Teilchen konstruiert werden muss).

Im Programmcode der Simulation lässt sich dementsprechend leicht die Hierarchie der Modellannahmen identifizieren, die sich auch in der Aufgabenanalyse wiederfindet.

Kapitel 7

Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Dieses Kapitel

- gibt einen Überblick über Ziele und Inhalte der empirischen Studien.
- stellt eine qualitative Pilotstudie und zwei umfangreichere Untersuchungen vor.

7.1 Überblick über die Studien

Im interpretativen Realismus, der erkenntnistheoretische Grundlage dieser Arbeit, wird angenommen, dass in empirischen Untersuchungen Realität und Interpretationsschemata untrennbar miteinander wechselwirken, so dass keine vom Erkenntnisprozess unabhängigen Aussagen über die Realität möglich sind: Empirische Untersuchungen sind in dieser Sichtweise immer von Interpretationsschemata „imprägniert“, die bei ihrer Erstellung, Durchführung, Beobachtung und Interpretation gebraucht werden. Dennoch können empirische Untersuchungen von theoretischen Annahmen wertvolle Hinweise auf ihre empirische Gültigkeit geben, wenn angenommen wird, dass Interpretationsschemata und Realität stabil miteinander interagieren - ein stabiles Resultat ergeben - wenn sie zueinander passen. Empirische Untersuchungen über den Erwerb des Teilchenmodells bringen also in dieser Sichtweise die zusätzliche Ebene der Realität ins Spiel und sind damit ein wertvoller Bestandteil bei der Entwicklung wissenschaftlicher Aussagen (siehe auch Kapitel 2 bzw. Lenk, 1998, Kap.8).

Die vorgestellten Untersuchungen dienen dem Ziel der Arbeit, ein lernpsychologisches Prozessmodell zu erarbeiten. Die drei hier vorgestellten Untersuchungen sind ein erster Schritt hin zu weiteren empirischen Untersuchungen dieses Modells und reichen nicht aus, gesicherte Aussagen über das vorgestellte Prozessmodell zu machen. Notwendigerweise stehen hier die lernpsychologischen Merkmale des Teilchenmodellerwerbs im Vordergrund und nicht so sehr die erworbenen Inhalte (wie es bei „normalen“ fachdidaktischen Untersuchungen der Fall wäre).

Während zur Wirkung von computergestützten Einführungen in das Teilchenmodell schon einige Untersuchungen durchgeführt wurden (s. Kap.3), ist die zentrale lernpsychologische Annahme dieser Arbeit, dass die erste individuelle Bildung eines Teilchenmodells gut durch analogiebasiertes Lernen beschrieben werden kann, bisher noch nicht empirisch untersucht worden. In die hier beschriebenen empirischen Untersuchungen des analogiebasierten Teilchenerwerbs wurden gleichzeitig andere Untersuchungsziele (wie die Replikation von Untersuchungen zur Wirksamkeit der computergestützten Konstruktion einer Teilchenklärung oder Fragen nach Einflussfaktoren auf das Lernen mit Animationen) integriert.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Im folgenden werden 3 Studien beschrieben, die mehrere Gruppen von Fragestellungen untersuchen:

Mit der ersten und zentralen Fragestellung wird untersucht, ob sich der erste Erwerb des Teilchenmodells durch analogiebasiertes Lernen beschreiben lässt. In der explorativen Pilotstudie 1 spielt diese Frage eine wichtige, in der Studie 2 eher eine untergeordnete Rolle. Insbesondere in der Studie 3 steht diese Fragestellung im Mittelpunkt, wenn die Wirkung von Analogien durch die aufeinander folgende Induktion zweier unterschiedlicher Analogien beim Erwerb des Teilchenmodells geprüft wird.

Die zweite, etwas weiter gefasste Art von Fragestellungen dreht sich um die Einflussfaktoren auf und Effekte des Lernens mit Animationen und dem computergestützten Konstruktionswerkzeug. Denn neben der Wirkung des Konstruktionswerkzeugs auf den Lernprozess interessieren auch mögliche Einflüsse auf diesen Lernprozess. Welche unterschiedlichen Effekte haben die Lernmaterialien Text und Bilder gegenüber den Animationen bei Lernverlauf und Lerninhalt? Wirkt sich aktives Konstruieren eines dynamischen visuellen Teilchenmodells im Vergleich zu passivem Rezipieren von Animationen auf den Lerneffekt aus? Wie wirken Selbsterklärungen beim Betrachten von Animationen? Welche Auswirkungen haben zeitliche Aufteilungen der Animationssequenzen. Diese Fragen stehen bei den Studien 1 und 2 im Zentrum der Untersuchungen.

Die Studie 2 diente zusätzlich dazu, geeignetes Testmaterial zu entwickeln und Erhebungsinstrumente zu prüfen.

Allen Studien gemeinsam ist eine Lernphase. In ihr arbeiteten die Versuchspersonen an der Erklärung von Phänomenen oder Experimenten durch das Teilchenmodell. Dabei variierten die Lernmedien von Text und Bildern (Studie 1) bis zur computergestützten Konstruktionsumgebung (Studie 3). Um den Effekt der Lernphase durch Vergleich des Wissensstandes vor und nach dem Lernen feststellen zu können, wurden alle Untersuchungen mit einem Prätest-Posttest-Design konzipiert. Vor der Lernphase bearbeiteten die Versuchspersonen zur Feststellung ihres Vorwissenstands also einen für die Inhalte der Lernphase spezifischen Prätest, bei in Studie 1 und 2 zusätzlich noch einen allgemeinen Vorwissenstest. Der Prä- und der Posttest beinhaltete die Erklärung von Experimenten mit unterschiedlichen Itemformen. Diese Erklärungsaufgaben im Prä- und Posttest waren einander entweder sehr ähnlich oder identisch, um den Effekt des Lernprozesses durch einen Vergleich von Prä- und Posttest feststellen zu können. Ähnlich heißt hier, dass sich die Testaufgaben von den Lernaufgaben und auch voneinander lediglich in Oberflächeneigenschaften unterschieden, nicht aber hinsichtlich der Lösungswege für die akzeptierte Aufgabenlösung mit dem Teilchenmodell. Die Lernaufgaben der Lernphase waren den Aufgaben der Lernphase in allen 3 Studien nur ähnlich (wiederum bezüglich der Oberflächeneigenschaften), damit nicht eine einfache zweifache Wiederholung der gleichen Aufgaben einen reinen Wiederholungseffekt auf den Posttest bewirken sollte.

Die erste Studie diente dazu, anhand von 6 Einzelfallbetrachtungen von Versuchspersonen und Schülern der Klasse 8 eines Gymnasiums die Wirkung des Lernens von drei unterschiedlichen Medienkombinationen qualitativ zu explorieren: Zwei Versuchspersonen und Schüler lernten mit Text, zwei mit Text und Bildern und zwei mit Text und Animationen. Neben einem allgemeinen Vorwissenstest zu Stoffauffassungen bearbeiteten die Versuchspersonen im Prätest Erklärungen von 3 Experimenten. Der Posttest dieser Studie war identisch mit dem Prätest.

Weil sich in der explorierenden Studie 1 herausgestellt hatte, dass geeignete Items für eine änderungssensitive Messung (durch Prä- und Posttest) erst gefunden werden mussten, hatte die zweite Studie zwei unterschiedliche Hauptzwecke: Um erstens einen geeigneten änderungssensitiven Satz von Testitems für Prä- Postdesigns beim Erwerb des Teilchenmodells mit Animationen zu erhalten, wurde für 3 Testaufgaben (bei denen Lern-, Prätest- und Posttestaufgaben einander ähnlich waren) ein umfangreicher und differenzierterer Itempool erstellt und auf Veränderungseffekte geprüft. Das zweite Ziel dieser Studie war es, den Einfluss von Selbsterklärungen und der zeitlichen Aufteilung der Animationssequenzen zu untersuchen. Ein positiver Effekt von Selbsterklärungen und zeitlicher Aufteilung der Animationssequenzen würde nämlich wertvolle Gestaltungshinweise auf die Gestaltung des Lernens mit Animationen geben. Als Nebeneffekt fielen bei dieser Studie Informationen über die Wirksamkeit von Animationen beim Teilchenmodellerwerb an.

Die letzte und für diese Arbeit spezifischste Studie beschäftigte sich mit der Hypothese des Lernmodells dieser Arbeit, dass Analogien zu kleinsten Teilchen bei der ersten Bildung des Teilchenmodells herangezogen werden. Dazu wurden zwei Gruppen aus Versuchspersonen der 8. Klasse einer Realschule zwei unterschiedliche Geschichten präsentiert, die unterschiedliche Analogien enthielten. In der folgenden Testphase wurde anhand der Erklärung zweier Experimente geprüft, auf welche Art die beiden Geschichten die Bildung des entsprechenden Teilchenmodells beeinflussten. Eine Woche später bearbeiteten alle Versuchspersonen zwei den Testaufgaben ähnliche Lernaufgaben durch aktives Konstruieren in der computergestützten Konstruktionsumgebung. Der abschließende Posttest - identisch mit dem Test nach der Analogieinduktion - überprüfte, ob welche Lerneffekte das Lernen durch aktive Konstruktion in der Konstruktionsumgebung bewirkte. Bei der Untersuchung der Analogieeffekte fielen auch hier wieder Informationen über die Wirksamkeit des Arbeitens mit dem Lernmedium, der computergestützten Konstruktionsumgebung ab.

7.2 Pilotstudie an 6 Versuchspersonen der 8. Klasse eines Gymnasiums (Einzelfallstudie)

In der ersten Studie wurden explorativ die kognitiven Aspekte der ersten Stadien des Erwerbs des Teilchenmodells mit verschiedenen Medienkombinationen untersucht: Text, Text mit Bildern und Text mit Animationen. Die Untersuchung sollte einen ersten qualitativen Überblick über diesen Erwerbsprozess liefern und arbeitete deshalb mit wenigen Versuchspersonen, die in Einzelsitzungen mit dem Versuchsleiter einige Papier- und Bleistift Aufgaben bearbeiteten, hauptsächlich aber verbale Deutungen chemischer Experimente gaben.

7.2.1 Ziele

Mit dieser Pilotstudie sollte an 6 Einzelfällen explorativ untersucht werden, wie der Einsatz von Text, Bildern und Animationen bei Anfängerinnen und Anfängern auf den Erwerb des Teilchenmodells wirkt. Insbesondere sollte abgeschätzt werden können,

- welche Lernprozesse sich bei den einzelnen Versuchspersonen zeigen.
- ob das Vorwissen über makroskopische Gaseigenschaften den Erwerb eines mentalen Teilchenmodells erleichtert oder erschwert, insbesondere ob diese Vorstellungen über analoge Verknüpfungen leicht mit einem diskreten Modell verbunden werden kann. Wenn dies nicht zutrifft, stünden die Alltagsvorstellungen Konkurrenz zu einem mentalen Teilchenmodell und würden sich eventuell im unterrichtlichen Lernprozess schon aufgrund ihres langjährigen Gebrauchs durchsetzen.
- ob die gewählten identischen Aufgaben des Prä- bzw. Posttests geeignet sind.
- ob ein Prä-Post-Design zur Untersuchung des Lernprozesses geeignet ist.

7.2.2 Methode

7.2.2.1 Versuchspersonen

Die Untersuchung wurde an einem Gymnasium in Rheinland-Pfalz mit 3 Schülerinnen und 3 Schülern einer 8. Klasse durchgeführt. Ihr Alter betrug zwischen 13 und 15 Jahren. Die Teilnehmenden hatten bereits einige Monate am Chemieunterricht teilgenommen, allerdings noch keine Unterrichtseinheit über das Teilchenmodell erhalten.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

7.2.2.2 Untersuchungsdesign

Tabelle 7.1 fasst das Untersuchungsdesign der Studie zusammen:

Untersuchungsphase	Gruppe 1 (Text): 2 Versuchspersonen	Gruppe 2 (Text und Bilder) 2 Versuchspersonen	Gruppe 3 (Text und Animationen) 2 Versuchspersonen
Untersuchungsphase 1 (gleich für alle Gruppen gleicher Vorwissenstest)	Verschiedene Paper & Pencil Tests (Brook & Driver, 1989)	Verschiedene Paper & Pencil Tests (Brook & Driver, 1989)	Verschiedene Paper & Pencil Tests (Brook & Driver, 1989)
Untersuchungsphase 2 Prätest (für alle Gruppen gleicher Prätest)	Brownsche Bewegung	Brownsche Bewegung	Brownsche Bewegung
Untersuchungsphase 3 (für alle Gruppen gleiche Lernphase)	Lernmaterial Text: 1. „Diffusion“ von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Diffusion von Brom in Luft	Lernmaterial Text: 1. „Diffusion“ von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Diffusion von Brom in Luft	Lernmaterial Text: 1. „Diffusion“ von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Diffusion von Brom in Luft
Untersuchungsphase 4 Posttest (für alle Gruppen gleicher Nachphase)	Brownsche Bewegung	Brownsche Bewegung	Brownsche Bewegung

Tabelle 7.1: Versuchsdesign der Studie 1

Alle Versuchspersonen durchliefen zunächst den Vorwissenstest, in dem sie ihre Vorstellungen zu Gasen äußern sollten. Danach sollten sie das Phänomen der Brownschen Bewegung in einem Prätest erklären, bevor sie in einer Lernphase 2 die Benutzung des Teilchenmodells zur Erklärung zweier Diffusionsphänomene erlernen sollten. Der Effekt dieser Lernphase sollte danach im Posttest sichtbar werden. Die Versuchsdauer betrug etwa anderthalb Stunden.

7.2.2.3 Untersuchungsmaterial

Material für den Vorwissens-, Prä- und Posttest

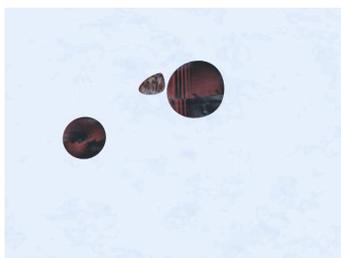


Abbildung 7.1: Screenshot aus der Animation zur Partikeln in einer wogenden Substanz

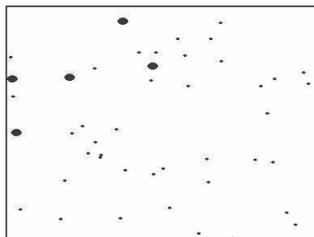


Abbildung 7.2: Screenshot aus der SIMulation zweier kollidierender Partikelsorten

Vorwissens-, Prä- und Posttest wurde wie folgt erstellt und durchgeführt:

Für den Vorwissenstest wurden aus der Studie von Brook & Driver (1989) Papier-und-Bleistift Items übernommen, die die anfänglichen Vorstellungen über das makroskopische Verhalten von Gasen erfassen sollten (siehe Anhang).

Im Prä- und Posttest bearbeiteten die Versuchspersonen folgende Aufgabe: Sie betrachteten zunächst unter einem Lichtmikroskop die Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser. Anschließend wurden ihnen 2 Animationen mit verschiedenen Erklärungsansätzen auf dem Computerbildschirm gezeigt:

- Die erste Animation zeigt Partikel, die sich mit einer wogenden Flüssigkeit bewegten (Abb.7.1)
- Die zweite Animation zeigte Kollisionen von 2 Partikelsorten, die zu Änderungen der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit führten (Abb. 7.2).

Die Versuchspersonen sollten sich entscheiden, welche Animation den Grund für die Brownsche Bewegung besser zeigte und ihre Entscheidung begründen. Datenerhebungsmethode. Alle Antworten wurden dem Untersuchungsleiter mündlich gegeben und auf einem Videoband festgehalten.

Lernbedingungen

Zunächst lasen die Versuchspersonen einen einführenden Text über das Teilchenmodell (siehe Anhang) der Gase. Danach sahen sie zwei einfache Experimente, die im Untersuchungsraum aufgebaut waren:

- Im ersten Experiment sahen sie die „Diffusion“ von Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff durch einen Tonzylinder.
- Im zweiten Experiment sahen die Versuchspersonen die Diffusion von Bromdampf unter zwei Bedingungen:
 - In der ersten Bedingung diffundierte der Bromdampf langsam aus einem waagrecht montierten Glasbehälter in einen zweiten, nachdem ein Durchlass zwischen den beiden Gehältern geöffnet worden war.
 - In der zweiten Bedingung diffundierte der Bromdampf in den zweiten Behälter, der diesmal aber unter niedrigerem Druck stand, nachdem die Luft teilweise abgesaugt worden war.

Nach der Präsentation der Experimente durch den Versuchsleiter studierten die Versuchspersonen auf dem Rechnerbildschirm das Lernmaterial. Die drei Lernbedingungen Lernen mit Text, Lernen mit Text, und Lernen mit Text und Bildern und Lernen mit Text und Animation unterschieden sich folgendermaßen:

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

- In der Bedingung *Lernen mit Text* wurden die Versuchspersonen lediglich Text präsentiert, der den Versuch mit einem Teilchenmodell der Gase erklärte.
- In der Bedingung *Lernen mit Text und Animationen* wurden den Versuchspersonen neben dem Text Animationen präsentiert, die mit bewegten Teilchenmodellszenen eine Erklärung des makroskopischen Phänomens darstellten.
- In der Bedingung *Lernen mit Bildern und Animationen* wurden den Versuchspersonen neben dem Text Bilder mit Teilchenmodellszenen dargeboten, die als Schnappschüsse der entscheidenden Augenblicke aus den Animationen der Lernbedingung *Lernen mit Text und Animationen* hergestellt worden waren.

7.2.2.4 Auswertungsmethode

Die Versuchspersonenäußerungen zu den Fragen und den Lernbedingungen wurden auf Tonband aufgenommen und transkribiert. Die Transkripte wurden auf folgende Merkmale untersucht:

- Äußerungen von Alltagskonzepten Wissenstest vor dem eigentlichen Prätest
- Unterschiede in der Deutung des Experiments zur Brownschen Bewegung zwischen Prä- und Posttest
- Änderungen der im Wissensvortest vor dem Experiment geäußerten Vorstellungen in der Lernphase - auch in Abhängigkeit von der Lernbedingung.

7.2.3 Ergebnisse

7.2.3.1 Wissenstest vor dem eigentlichen Prätest

Zunächst werden für die bessere Lesbarkeit die Aufgabenstellungen 1 bis 10 hier noch einmal kurz umrissen (der kompletter Wortlaut aller Fragen mit den Abbildungen befindet sich im Anhang):

Aufgabe 1

Die nebenstehende Zeichnung stellt ein Honigglas mit einem Deckel dar.

- a) Befindet sich irgendetwas im Honigglas?
- b) Was passiert, wenn man den Deckel abnimmt?
- c) Was passiert, wenn man nach dem Abnehmen den Deckel wieder aufsetzt?

Aufgabe 2

Die nebenstehende Zeichnung zeigt einen großen Behälter mit Wasser und darüber ein offenes Honigglas mit seiner Öffnung nach unten gerichtet.

- a) Befindet sich etwas im Honigglas?
- b) Was wird passieren, wenn man das umgedrehte Honigglas mit der Öffnung nach unten ins Wasser taucht?

Aufgabe 3

Rechts siehst du eine Glasflasche. Sie ist mit einem durchbohrten Gummistopfen verschlossen. Im Loch des Gummistopfens steckt ein Glastrichter.

- a) Befindet sich irgendetwas in der Flasche?
- b) Was passiert, wenn man Wasser in den Glastrichter schüttet? Warum?

Aufgabe 4

Links siehst Du die skizzierte Abbildung einer Balkenwaage (der lange Stab ist der Balken mit dem Dreieck als Aufhängungspunkt). An der Balkenwaage hängen zwei Luftballons, die genau gleich

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

stark aufgeblasen sind und auch genau gleich schwer sind. Der Balken der Waage befindet sich also in horizontaler Position.

- Befindet sich etwas in den Ballons?
- Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn einer der Ballons mit einer Nadel zum Platzen gebracht würde? Warum?
- Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn aus einem der Ballons Luft herausgelassen würde? Warum?
- Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn einer der beiden Ballons weiter aufgeblasen würde?

Aufgabe 5

Rechts siehst Du eine Glasspritze.

- Was würdest Du spüren, wenn Du den Stempel in die Spritze hinein bewegst? Warum?
- Was würdest Du spüren, wenn Du den Stempel aus der Spritze herausziehst? Warum?

Aufgabe 6

Rechts siehst du zwei Glasspritzen, die mit einem dicht sitzenden Gummischlauch miteinander verbunden sind.

- Was passiert, wenn Du den Stempel der Spritze A in die Spritze hinein drückst? Warum?
- Was passiert, wenn Du den Stempel der Spritze B herausziehst? Warum?

Aufgabe 7

Rechts siehst Du ein Trinkglas mit Orangensaft und einem Strohhalm. Stelle Dir vor, Du trinkst mit dem Strohhalm den Orangensaft!

- Was passiert, wenn Du den Saft mit dem Strohhalm trinkst?
- Wie kommt es, daß beim Trinken der Saft sich im Strohhalm nach oben bewegt?

Aufgabe 8

Rechts siehst Du einen Saugnapf, wie man ihn zum Öffnen verstopfter Abflüsse benutzt.

- Was passiert, wenn Du den Saugnapf nach unten gegen den Boden drückst?
- Warum ist es schwierig, den Saugnapf danach wieder vom Boden hoch zu ziehen?

Aufgabe 9

Rechts sind zwei Spritzen, deren Kolben bis zum Anschlag in den Spritzen stecken.

- Was spürst Du, wenn Du den Kolben der Spritze A nach außen ziehst?
- Wenn Du den Kolben nach außen gezogen hast, was ist dann in der Spritze A?
- Was passiert, wenn Du dann den Kolben wieder los lässt? Warum?

Aufgabe 10

Rechts siehst Du ein offenes Honigglas, das auf dem Kopf stehend in ein Gefäß mit Wasser getaucht ist. Das Honigglas ist mit Wasser gefüllt, bis auf eine kleine Luftblase, die sich an der oberen Wand des Honigglases befindet.

- Warum bleibt das Wasser in dem Honigglas, obwohl der Wasserstand in dem Gefäß viel niedriger ist als in dem Glas?

Im Folgenden werden die Haupttendenzen der Antworten zu den Aufgaben zusammengefasst.

Aufgabe 1.2.3 (Luft als Raum einnehmender Körper): Alle Versuchspersonen nahmen in ihren Antworten zu den ersten 3 Aufgaben an, dass sich Luft in offenen und geschlossenen Gefäßen befindet und dass Luft einen Raum einnimmt, sowie Wasser verdrängen kann. Diese makroskopische Vorstellung steht dem Aufbau des submikroskopischen Teilchenmodells der Gase über die Bildung von Analogien nicht im Weg, weil die hypothetischen Teilchen als massive Körper ebenfalls einen Raum einnehmen. Bezüglich dieser grundlegenden Voraussetzung können analoge Relationen zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene also gebildet werden.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Aufgabe 4 (Gewicht von Luft): 5 von 6 der Versuchspersonen gaben an, dass Luft ein Gewicht besitzt. Auch bezüglich dieser grundlegenden Voraussetzung können analoge Relationen zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene gebildet werden. Die 6. Versuchsperson nahm an, dass Luft kein Gewicht habe.

Aufgabe 5 (Expandierbarkeit und Kontrahierbarkeit von Luft): 5 von 6 Versuchspersonen nahmen an, dass Luft in einem begrenzten Ausmaß kontrahier- und expandierbar ist. Diese makroskopische Vorstellung steht bei fast allen Versuchspersonen der Entwicklung eines entsprechenden submikroskopischen Modells nicht im Wege. Die 6. Versuchsperson nahm dementsprechend an, dass Luft nicht kontrahier- und expandierbar ist.

Aufgabe 6, 7, 8, 9, 10 (Druckdifferenzen und Vakuum): 4 von 6 Versuchspersonen argumentieren, dass verdünnte Luft bzw. Vakuum eine eigenständige kontrahierende Wirkung ausübt. Sie sehen Vakuum also nicht als einen materielosen Raum, der keine mechanischen Kraftwirkungen ausübt. Dementsprechend argumentieren sie höchstens teilweise mit Druckdifferenzen und den Kräften des Luftdrucks und sollten keine submikroskopischen Vorstellungen entwickeln, die dem Vakuum passive Eigenschaften bei der Bewegung von kleinsten Teilchen zuschreiben. 2 Versuchspersonen schrieben verdünnter Luft (bzw. Vakuum) keine aktive Wirkung zu, sondern argumentierten auf „richtige“ Weise mit Luftdruckdifferenzen.

7.2.3.2 Prä- und Posttest

Die Versuchspersonen gaben schon im Vortest an, dass von den beiden angebotenen Animationen zur Brownschen Bewegung diejenige mit Zusammenstößen zwischen zwei Teilchensorten im Vergleich zur derjenigen, in der sich die Partikel mit einer hin und her wogenden Flüssigkeit bewegten, die Beobachtung unter dem Mikroskop besser erklärte. Im Posttest blieben sie bei dieser Erklärung. Zur Erklärung kommen mehrere Gründe in Frage:

- Die Erklärung durch Teilchenzusammenstöße entspricht einem bekannten Konzept (Klickerfahrung, Boule, Billard etc) und beruht auf einem einfachen, überzeugendem Konzept.
- Demgegenüber wirkt die Animation, in der Bröckchen mit den Schwankungen einer Flüssigkeit hin- und her bewegt werden, wenig überzeugend. Zudem ist die Animation relativ kurz.
- Eventuell haben die Versuchspersonen doch schon an mehreren Stellen im Schulunterricht oder zu Hause etwas über das Teilchenmodell der Stoffe erfahren.

Damit ist der Prä- und Posttest nicht mehr als Kriterium zur Untersuchung des Lerneffekts brauchbar, weil sich die Aufgabe als zu leicht und damit als nicht änderungssensitiv erwies. Sie wird im Weiteren deshalb nicht mehr betrachtet. Durch den Wegfall der Testaufgaben des Prä-Post-Designs können keine Lernzuwächse mittels der Testaufgaben festgestellt werden. Deshalb wird im Folgenden anhand zweier qualitativer Fallbetrachtungen von Teilen des Vorwissenstests und der Lernphase gezeigt, dass die Bilder und Animationen im Einzelfall zu interessanten Lerneffekten führen können, die aber nicht durch Unterschiede zwischen Prä- und Posttest aufgewiesen werden, sondern lediglich durch Interpretationen von Prätestantworten und Verhalten in der Lernphase. Dabei werden von den Vortestaufgaben nur die Aufgaben 4, 7 und 8 geschildert, weil sie die zentralen Informationen zur Luft enthalten, die im Vorwissenstest abgefragt wurden (Luft als Körper, Gewicht von Luft, Druckdifferenzen bzw. Verhalten von Vakuum). Daneben werden diejenigen Äußerungen geschildert, die das Verständnis der beiden Demonstrationsexperimente und ihre Erklärungen im Lernprogramm charakterisieren.

7.2.3.3 2 Fallbetrachtungen

Fall 1: Carolin (Name geändert)

Carolins Antworten zu Aufgabe 4

„Ja, Luft“

„Ich glaube, die Seite [mit dem zerplatzten Ballon] wird ein bisschen leichter werden.“

...

„Vielleicht ist die Luft, die aus dem Ballon herausgeht, etwas leichter als die andere Luft.“

„Ich glaube, es würde nichts passieren“

„Es würde auch nichts passieren.“

Carolins Antwort zu Aufgabe 4b weist darauf hin, dass sie in einer ersten Vermutung der aus dem zerplatzenden Ballon entweichenden Luft ein niedrigeres Gewicht zuweist als der Luft im intakten Ballon. In der Frage 4c und 4d scheint sie der abgelassenen bzw. der hinzugepumpte Luft keine Gewichtswirkung zu attribuieren. Carolin denkt hier offenbar, dass die Luft in unterschiedlichen Situationen (ursprünglich im Ballon eingeschlossene Luft, aus dem zerplatzenden Ballon entweichende Luft, Ballon mit weniger Luft, Ballon mit mehr Luft) entweder ein größeres oder geringeres Gewicht besitzt. Als alternative (wegen der relativ klaren Antwort in Frage 4b aber eher unwahrscheinlich) Deutung könnte allerdings in Frage kommen, dass Carolin den in ihrer Sicht schon mit Gewicht versehenen Luftballons die Tendenz zuschreibt, dass sie im intaktem Zustand in der Schwebe bleiben (physikalisch gesehen müsste dazu ein Auftrieb durch die umgebende Luft vorhanden sein), dass die aus einem zerplatzenden Ballon entweichende Luft einen stärkeren Auftrieb erfährt, dass die Luft in einem durch Luftablassen kleineren Ballon weniger Auftrieb erfährt und die Luft in einem größeren Ballon einen stärkeren.

Falls Carolin (was - wie eben begründet - wahrscheinlicher ist) meint, dass gleiche Volumina von Luft (unter sonst gleichen Bedingungen) unterschiedliches Gewicht haben können, ist ihre Auffassung vom unterschiedlichen Luftgewicht gleicher Volumina nicht gut mit dem Partikelmodell der Luft vereinbar. Denn das später vermittelte Teilchenmodell schreibt den kleinsten Partikeln als massiven Körpern ein invariantes Gewicht zu.

Carolins Antworten zu Aufgabe 7

Carolins Antworten zu Aufgabe 7:

„Der Saft bewegt sich nach oben.“

„Zuerst zieht man die Luft aus dem Strohalm. Und wenn keine Luft mehr im Strohalm ist, muss etwas anderes reinkommen. Für die Luft kommt dann der Saft.“

...

„Weil die Flüssigkeit kein festes Material ist“.

Carolins Antworten lassen sich mit einem Alltagskonzept vereinbaren, dass Vakuum die Eigenschaft besitzt, von selbst zu verschwinden und in der Folge andere Substanzen in den hinterlassenen Raum zu ziehen, wenn die Substanzen genügend beweglich sind.

Falls dieses Konzept aktiviert wird, wenn im Rahmen des Teilchenkonzepts Gasdruckunterschiede erklärt werden sollen, wird es wahrscheinlich zu Mischkonzepten zwischen dem Alltagskonzept des aktiv saugenden Vakuums und dem Teilchenkonzept kommen.

Der Begriff des Mischkonzepts wird hier dem kognitiven Verständnis von Konzepten folgend gebraucht: Er kennzeichnet Konzepte, bei denen Bruchstücke makroskopischen Stoffwissens so mit Teilen des neuen Stoffmodells verbunden werden, dass ein nach dem wissenschaftlichen Konsens unzulässiges Teilchenkonzept entsteht, denn es enthält Eigenschaften aus makroskopischer und Modellebene. Im vorliegenden Fall könnte ein mentales Teilchenmodell der Stoffe vorliegen, in dem allerdings das Vakuum als ein aktiver Agent, und nicht als passiver leerer Raum verstanden wird. Dieses Verständnis von Vakuum könnte aus bekannten makroskopischen Phänomenen gebildet worden sein (z.B. aus der Erfahrung, dass ein prall aufgepumpter Luftballon sich sofort zusammenzieht, wenn die Luft daraus abgesogen wird). Das aktiv saugende Vakuum kann logisch in das Teilchenkonzept integriert werden, solange nicht durch makroskopische Beobachtungen belegt wird, dass Vakuum keine Kraft auf Gase ausübt.

Carolins Antworten zu Aufgabe 8

„Das hier ist Gummi und es ist elastisch. Und wenn man es dagegen presst, geht die Luft raus. Und wenn man mit dem Pressen aufhört, klebt es am Boden. Da ist ein bisschen Vakuum drinnen.“

Auch die Antwort in Aufgabe 8 weist darauf hin, dass Carolin das „bisschen Vakuum“ (damit meint sie wahrscheinlich den verminderten Druck) dafür verantwortlich macht, dass der Saugnapf am Boden feststeckt, und nicht die Druckdifferenz zum atmosphärischen Luftdruck, der stärker auf das Gummi drückt, als der Druck der im Saugnapf verbliebenen Luft.

Äußerungen auf die experimentellen Beobachtungen:

Experiment 1:

Nach der Beobachtung der „Diffusion“ von Wasserstoff durch den Tonzylinder studiert Carolin die entsprechenden Seiten auf dem Bildschirm:

VP: „Ich versteh nicht, warum das gerade in den Tonzylinder geht!“

VP: „Es könnte ja auch, es hat ja ziemlich viel Platz, überall drum herum.“

VP: „Könnte ja da herausgehen.“

VP: „mmh“

VP: „Da geht das Gas nicht in den Tonzylinder rein...“

VP [liest laut]: „Wird Wasserstoff verwendet, beginnen aus der Glasrohrspitze im Wasser Bläschen zu sprudeln. Wenn man dagegen Sauerstoff oder Stickstoff verwendet, passiert nichts.“

VP: „Ja!“

VP [liest laut]: „Wasserstoff muss also irgendwie durch die Wände des Tonzylinders gedrungen sein, Stickstoff und Wasserstoff dagegen nicht...“

VP [liest laut]: „Um ihr unterschiedliches Verhalten in unserem Experiment zu verstehen, müssen wir uns deshalb im Kopf eine Vorstellung machen, ein Modell, von Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff.“

VP: „Ich kann mir jetzt irgendwie nichts darunter vorstellen, was ich jetzt da denken soll...“

VP: „Ja, vielleicht, dass sich der Sauerstoff in so kleine Teilchen zersetzen kann, dass er durch die Wand durchgehen kann und dann wieder in eins... und dann wieder an der anderen Seite zusammengeht. Und Sauerstoff und der Stickstoff können sich eben nicht teilen...“

VP: „Ja bei dem Wasserstoff denk' ich eben, dass Wasserstoff ganz, ganz, kleine Teilchen sind, die durch..., also, das sind ja ganz klitzeklein von Gestalt, und Sauerstoff und Stickstoff nicht. Die können sich nicht so klein zersetzen, oder überhaupt nicht...“

VP [liest laut]: „Das folgende Bild zeigt Wasserstoffteilchen vor der Tonwand.“

VP: „Ja, das sind die Teilchen so, dass sie durchgelassen werden.“

VP: „Die nächste Abbildung zeigt Stickstoffteilchen, oder wenn man will, Sauerstoffteilchen vor der Tonwand.“

VP: „Ja. Die können sich eben nicht so fein zerteilen, wie die Wasserstoffteilchen.“

a) Angesprochene makroskopische Inhalte

Carolin spricht wenige makroskopische Inhalte an, sie erwähnt direkt nur, dass Wasserstoff durch den Tonzylinder dringen muss (Äußerung 11), Stickstoff hingegen nicht. Indirekt bezieht sie die makroskopische Ebene mit ein, als sie im letzten Teil ihrer Antworten die erklärende Vorstellung bildet (Äußerung 11), dass sich Wasserstoff zu kleinen Teilchen zerteilt und sich nach dem Durchdringen der Tonwand wieder vereint, Stickstoff dieses Verhalten nicht zeigt.

b) Inhalte des Teilchenmodells

Carolin erwähnt Inhalte der Modellebene nur bei der eben beschriebenen Erklärung des Experiments durch das unterschiedliche Teilungsverhalten der Gase.

c) Metatheoretische Inhalte über Modelle

Carolin reagiert an der Stelle des Texts (Äußerung 10) ratlos, an der es um Modelle von Stoffen geht. Es geht aus ihrer Antwort nicht hervor, ob es ihr nicht klar ist, was es bedeutet, sich ein Modell eines Stoffes zu bilden, und/oder ob sie Schwierigkeiten hat, sich eine für sie inhaltlich plausible Vorstellung darüber zu formen, wie die Wasserstoffteilchen die Tonwand durchdringen

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

könnten. Da sie an keiner anderen Stelle ihrer Antworten den Modellbegriff benutzt und auch das Bild vom Zerteilen der Gase in Teilchen bringt (was vermuten lässt, dass sie eher keine Trennung von makroskopischer und submikroskopischer Welt vornimmt), benutzt sie hier wahrscheinlich die metatheoretische Ebene des Modellwissens überhaupt nicht.

d) Metatheoretische Inhalte über Experimente

Carolin äußert sich an keiner Stelle zur der Erkenntnismethodik eines Experiments, benutzt aber intuitiv richtig die unabhängige Variable (Art des Gases) zur Erklärung der abhängigen Variable. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass sie intuitiv die Heuristik verwendet, den einzigen Unterschied zwischen den beiden Versuchsteilen für die unterschiedlichen Beobachtungen verantwortlich zu machen (Lewis, 1988).

Zusammenfassung:

Diese Äußerungen lassen sich zwanglos mit einem Alltagskonzept vereinbaren, das von Pfundt (1981) formuliert wurde: Kleinste Teilchen sind in dieser Sichtweise nicht erste (hypothetische) Aufbaueinheiten eines makroskopischen Stoffs, sondern Produkte seines Teilungsprozesses. Das bedeutet, dass Carolin wahrscheinlich die makroskopische gar nicht von der submikroskopischen Ebene trennt, keine Andersweltlichkeit des Teilchenmodells annimmt. Ihre Stoffvorstellung wäre in diesem Falle einheitlich. Die Antworten von Carolin sind in dieser Sichtweise die Übertragung von Teilungskonzepten direkt in ihre makroskopische Vorstellung der beiden Gase, wodurch die Gasvorstellungen in den nicht mehr beobachtbaren Bereich erweitert würden. Sie kennt vielleicht Stoffe, die sich leicht in kleinere Bestandteile aufteilen lassen (z.B. Marmorkuchen) und andere (z.B. Stahl), bei denen das viel schwieriger ist und überträgt diese Eigenschaften für die experimentelle Situation auf Wasserstoff und Sauerstoff. Die Antwort von Carolin demonstriert, dass es für eine Schülerin der Klasse 8 ohne naturwissenschaftliche Vorkenntnisse trotz eines entsprechenden einführenden Textes nicht nahe liegt, das abstrakte Konzept von kleinsten Teilchen als hypothetischen ersten Aufbaueinheiten anzuwenden. Ein solches neues Konzept, das getrennt von den bisherigen Erfahrungen wahrscheinlich zum ersten Mal in einem Text eingeführt wurde, wird sich wahrscheinlich erst dann allmählich im Alltagsgebrauch durchsetzen, wenn es auf viele variierende makroskopische Alltagserfahrungen angewendet wurde, die bisher mit einem oberflächenorientierten, d.h. also eher an makroskopischen, sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften orientierten, makroskopischen Stoffkonzept erklärt wurden.

Die Äußerungen von Carolin zeigen, dass sie es ohne Schwierigkeiten schafft, die Informationen des Bildes mit dem Teilchenmodell der Tonwand und der Gasteilchen mit ihrer Konzeption von Gasteilchen als Produkten eines Teilungsprozesses zu einer Mischkonzeption, in der Elemente des Teilchenmodells mit makroskopischen Elementen aus fachwissenschaftlicher Sichtweise „inkorrekt“ verknüpft sind, zu integrieren. Da es theoretisch zu jeder makroskopischen Beobachtung unendlich viele Interpretationsmodelle gibt (dies gilt generell, wenn sich die Erklärung auf eine „Black Box“ wie das Teilchenmodell der Stoffe bezieht, Wallach, 1998), werden wahrscheinlich neue makroskopische Erfahrungen (die z.B. nahe legen, dass sich kleinste Gasteilchen unter Normalbedingungen nicht mit chemischen Mitteln spalten lassen, ansonsten aber relativ unabhängig voneinander existieren) Schritt für Schritt Carolins mentale Mischkonzepte (aus Teilchenmodell und makroskopischen Eigenschaften) zu einem „reinem“ (d.h., lehrplangemäßen) Teilchenmodell hin verändern, das mit dem Teilchenmodell des Lehrplans vereinbar ist.

Dieser Interpretation liegt die Auffassung zugrunde, dass die Beobachtungsinterpretationen mithilfe des Teilchenmodells Interpretationen mithilfe eines nur vermuteten Mechanismus sind, für die - wie oben erwähnt - generell gilt, dass für jede Beobachtung unendlich viele mögliche Interpretationsmöglichkeiten gibt. Das bedeutet, dass Lernende - vor allem in diesem frühen Stadium des Unterrichts - nie logisch zwingend zum Teilchenmodell geführt werden können. Sie werden immer eine Möglichkeit finden können, neues Wissen in ihre makroskopisch orientierten Konzepte einzufügen.

Nach dieser Auffassung sollte es also leicht zu mentalen Mischformen des lehrplangemäßen Teilchenmodells mit makroskopischen Alltagsvorstellungen kommen, wenn im Wissen einer Versuchsperson nur wenige Elemente des diskreten Teilchenmodells und seiner Beziehung zur Welt der Phänomene enthalten sind, die aus ihrer Sicht nicht im Widerspruch zu aus dem Alltagswissen

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

übernommenen Erklärungen von Stoffphänomenen stehen und deshalb zwanglos angewendet werden können. Die aus der makroskopischen Alltagswelt übernommene Vorstellung, dass die kleinsten Teilchen der submikroskopischen Erklärungsebene durch Teilung der makroskopischen Stoffe entstanden sind, ist eine solche Annahme, die von Carolin ohne Probleme in das bisherige Wissen über die submikroskopische Ebene eingefügt werden kann.

Experiment 2:

VP: „Also einerseits ist es ja, wenn Luft drin ist, kann das Gas nicht mehr überströmen, weil da kein Platz mehr drin ist. Aber wenn keine Luft mehr drin ist, dann... mmmh, dann ist Platz drin...“

VP: „Ja durch das Glas kann keiner kommen, weil die eben dafür zu groß sind. Und durch diese Wand kann auch keiner kommen, weil da keine Löcher drin sind. Und dafür sind sie ja zu groß...“

VP: „Also, wenn die Luft rausgepumpt wird, dann werden die Teilchen ja auch..., mmmh, weg gesaugt irgendwie. Ja, wenn die Luft weg ist, dann sind die roten Teilchen auch weg. Und dann werden die grünen Teilchen auch so ein bisschen angesaugt, weil, wenn die Luft rausgesaugt wird, dann zieht sich das ja zusammen. Und wenn man die Trennscheibe wegmacht, dann fliegen die direkt rüber. So viel, wie die andere Seite braucht, bis sie... nicht mehr so zusammengezogen ist, bis wieder n' bisschen drin ist...“

VP: „Also, wenn die Luft sich innen drin nicht bewegt, dann bewegen sich auch die Teilchen nicht und dadurch vermischen die sich nicht.“

VP: „Wenn sich das rote Gas in den zweiten Behälter bewegt, müssen sich in unserem Modell entsprechend die kleinsten Teilchen von dem einen in den anderen Behälter bewegen.“

VP: „Warum bewegt sich das denn? Das bewegt sich doch nicht.“

VP: „Sie müssten. Aber sie tun's nicht.“

VP: „Die vielen Luftteilchen (im Modell rot) stoßen andauernd mit den mit den Teilchen des roten Gases (im Modell olivgrün) zusammen und können nicht gut vorwärts kommen.“

VP: „Ja, weil die roten Teilchen bilden so etwas wie eine Mauer und die grünen Teilchen bilde so etwas wie ein Mauer und dann stoßen sie zusammen und dann können die nicht durch. Weil, wenn in dem einen viel drin ist und in dem anderen viele drin ist, dann vermischt sich nicht.“

VP: „Ja, wenn jetzt keine Luft mehr da drinnen ist, dann bilden sie auch keine Mauer mehr und können die... das Gas rübergehen, ohne irgendwie auf Hindernisse zu stoßen.“

VP: „In der zweiten Apparatur sind weniger Luftteilchen, weswegen die Gasteilchen des roten Gases seltener mit Luftteilchen zusammenstoßen und weniger am Fortkommen gehindert werden. So kann man erklären, dass in diesem Versuch das rote Gas sehr schnell vorwärts kommt.“

a) Angesprochene Inhalte des Teilchenmodells

Carolin äußert sich im ersten Teil meist zu Eigenschaften der Teilchenebene, indem sie sie mit dem Verhalten des makroskopischen Gases vergleicht (z.B. Äußerung 1., 3., 4,5., 6., 7,11). Anfangs scheint sie das Verhalten der Gase direkt aus dem Verhalten der makroskopischen Gase abzuleiten (z.B. 4.) und mit dem Verhalten der Teilchen in der Animation zu vergleichen. Nicht ganz klar ist, was Carolin mit den Äußerungen 7. und 8. meint: Die Formulierung der Frage in 7. könnte vielleicht daher stammen, dass sie sich einen Stillstand der Teilchen in den beiden Behältern erwartet und sich die Teilchenbewegung aus dem Verhalten der makroskopischen Gase nicht ableiten kann. In den restlichen Äußerungen akzeptiert sie wahrscheinlich zunächst die Teilchenbewegung im Gasmodell und findet eine neue Erklärung für die langsame Diffusion: Die häufigen Zusammenstöße der beiden Teilchensorten an der Grenze zwischen ihnen verhindern eine schnelle Durchmischung der Teilchensorten. Danach betrachtet sie den Versuch mit Teilevakuierung der Luft und erklärt sich in 12. zunächst die schnelle Diffusion bei einem völligen Vakuum. Danach erklärt sie die leichtere Durchmischung der Teilchensorten bei Teilevakuierung damit, dass bei weniger Luftteilchen auch weniger Kollisionen stattfinden und damit „das rote Gas“sehr schnell vorwärts kommt“.

Ihre Äußerungen zur Wirkung des Vakuums weisen darauf hin, dass sie sowohl für den makroskopischen Bereich als auch für die submikroskopische Modellabbildung eine aktiv saugende Wirkung des Vakuums annimmt. Aus ihren Bemerkungen geht nicht hervor, dass sie diese Annahme am Ende ihrer Erklärung des Versuchs ändert und dem Vakuum keine aktive Rolle mehr zuschreibt.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Diese Auffassungsänderung scheint für sie allerdings hier auch nicht nötig zu sein, weil sie Teilchenbewegung und aktiv saugende Wirkung des Vakuums wahrscheinlich in ihrer Teilchenvorstellung miteinander vereinbaren kann.

b) Metatheoretische Inhalte über Modelle

Direkte Äußerungen über Modelle macht Carolin nicht, allerdings sind in den ersten Äußerungen, in denen sie Teilchenverhalten aus makroskopischem Gasverhalten ableitet, implizite Äußerungen über das Verhältnis von makroskopischer und Teilchenwelt enthalten. Es deutet nichts in Carolins Äußerungen 3, 4, 5, 7, 8 darauf hin, dass Carolin Modellwelt und makroskopische Teilchenwelt voneinander trennt, vielmehr lassen sich die Äußerungen mit der Hypothese aus Experiment 1 vereinbaren, dass sie Teilchen als Teilungsprodukte des makroskopischen Gases sieht, von Gas und Teilchen dasselbe Verhalten erwartet und wahrscheinlich keine Trennung zwischen makroskopischer Welt und dem andersweltlichen Teilchenmodell vollzieht (dafür gäbe es aus ihrer Perspektive wahrscheinlich zunächst keinen Grund). Die Annahme, dass Teilchen als Teilungsprodukte dasselbe Verhalten zeigen wie das makroskopische Gas wird wahrscheinlich in Frage gestellt, als sie die Darstellung der sich bewegenden Gasteilchen im Versuch ohne Teilevakuierung der Luft sieht, weil sie die Teilchen entgegen Carolins Erwartung nicht bewegen. Ohne dass sie darauf eingeht, dass sich makroskopisches Gas und Teilchen nicht mehr genau gleich verhalten, akzeptiert sie wahrscheinlich die Teilchendarstellung der Animation und findet eine neue Erklärung für das langsame Diffusionsverhalten (Äußerung 9). In den weiteren Äußerungen bleibt sie bei der Annahme sich bewegender Teilchen und konstruiert Erklärungen für die Unterschiede beider Versuche. Möglicherweise geht Carolin ohne größere Schwierigkeiten von ihrer Annahme gleichartigen Bewegungsverhaltens von Gas und Teilchen ab, akzeptiert die Teilchendarstellung der Animation und nimmt in den weiteren Äußerungen an, dass die Teilchen sich bewegen, während unter der Bedingung ohne Teilevakuierung das makroskopische Gas als Ganzes keine translatorische Bewegung vollzieht.

Falls diese Interpretation zutrifft und auch die Annahme, dass metatheoretische Wissen über die Trennung von Modellen und Phänomenen schwieriger zu verstehen ist, als die Teilcheninterpretation von Beobachtungen selbst (und für Carolin noch eine Überforderung darstellt), könnte aus den Äußerungen von Carolin der fachdidaktische Hinweis abgeleitet werden, dass bei der Einführung der Teilchenmodelle zunächst einmal der Modellbegriff zurückgestellt werden sollte, bis ein so reichhaltiges Repertoire an Beobachtungsinterpretationen durch das Teilchenmodell geleistet wurde, dass von ihnen wiederum einige Eigenschaften von Modellen induktiv erschlossen werden könnten.

c) Metatheoretische Inhalte über Experimente

Wiederum macht Carolin keinerlei explizite Aussagen über die Erkenntnismethodik des Experiments, allerdings weisen ihre Äußerungen darauf hin, dass die intuitiv den Unterschied zwischen beiden Experimenten (die Teilevakuierung im zweiten Versuch) für die unterschiedliche Beobachtung (die schnellere Diffusion im zweiten Versuch) verantwortlich macht.

Zusammenfassung:

Ihre Äußerungen können so interpretiert werden, dass Carolin anfangs Teilchen als Teilungsprodukte versteht, also wie im ersten Experiment keinen Unterschied zwischen makroskopischer und Modellwelt macht. Während sie bezüglich der Einzeleigenschaft der Teilchenbewegung einen ersten Unterschied zwischen makroskopischer und Teilchenwelt annimmt, problematisiert sie das allgemeine Verhältnis (die Andersweltlichkeit der Modellwelt) nicht. Aus ihrem Antwortverhalten könnte für die Fachdidaktik die Hypothese gebildet werden, dass Versuchspersonen und Schüler bei der Einführung des Teilchenmodells anhand der Deutung von Einzelbeobachtungen zunächst einzelne Unterschiede zwischen makroskopischer und Modellwelt erarbeiten sollten, und später bei der Problematisierung dieser Unterschiede die Abtrennung der andersweltlichen Modellebene vollziehen.

Zur metatheoretischen Ebene der Erkenntnismethodik eines Experiments macht Carolin keine Äußerung, sie scheint intuitiv eine Verbindung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable herzustellen. Die Art und Weise, wie Carolin ihre Teilchenvorstellungen bildet, ist mit der Hy-

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

pothese der Bedeutung des Analogiemechanismus vereinbar: Carolin überträgt im ersten Schritt Vorstellungen aus der makroskopischen Welt in die Teilchenwelt. Auch die Korrektur der Vorstellung der Teilchenbewegung kann als analoge Übertragung von Bestandteilen der gezeigten Animation auf ihre mentale Teilchenwelt verstanden werden, wobei die ursprünglichen Annahmen der Teilchenbewegung in den Hintergrund treten.

Fall 2: Dietmar (Name geändert)

Aus dem Vortest werden wiederum lediglich nur die Antworten zu den Aufgaben 4,7 und 8 berichtet, da die Aufgaben teilweise dieselben grundlegenden Alltagsvorstellungen erfassen sollen.

Dietmars Antworten zu Aufgabe 4

a) "Luft oder irgendein Gas, wobei ich mich eher für Luft entscheiden würde, weil es gibt ja auch Gas, bei denen die Luftballons nach oben steigen würden."

b) "wenn man jetzt einen Ballon zum Platzen bringen würde, dann ist halt dieses Gewicht, die Luft, weg, und die Balkenwaage neigt sich dann halt zu der Seite, wo der Luftballon mit der Luft ist."

...

"Weil halt hier kein Gegengewicht mehr ist und dieser Luftballon schon ein gewisses Gewicht hat."

c) "In dem Moment, in denen man das aufmacht, wird wahrscheinlich der Luftballon etwas runter drücken, durch den Druck, durch die Luft, die da rausströmt. Wenn man dann wieder zu macht, wird die Waage sich etwas mehr zu der Seite neigen, wo der ganze Ballon ist."

"Weil halt wieder in dem Ballon mehr Luft ist als in dem."

d) "wenn man jetzt wieder Luft in den reinblasen würde, ist mehr Luft darin, also mehr Gewicht, und die Waage würde sich zu dieser Seite neigen".

Dietmars Antworten weisen darauf hin, dass er im Gegensatz zu Carolin, die der Luft im geplatzten Ballon ein niedriges Gewicht attribuiert, einer bestimmten Luftportion in beiden Ballons in den unterschiedlichen Situationen (ob diese Portion Luft im Ballon festgehalten wird, ob sie ausströmt, herein gepumpt wird, etc.) des Experiments ein einheitliches Gewicht zuweist. Dieses Konzept ist leicht mit dem Partikelkonzept der Gase vereinbar, das die Annahme macht, dass Luftpartikel ein einheitliches Gewicht haben.

Dietmars Antworten zu Aufgabe 7

a) "Man muss halt mit einem gewissen Kraftaufwand - nicht in großem Maß - die Luft hier herausziehen und dann kommt der Saft hier nach, das zieht das so hier nach."

b) Das kommt halt dadurch, weil man halt zieht und hier gibt es einen Eindruck, die Luft von außen - vielleicht minimal."

...

Dietmars Antwort zu Aufgabe 7a ist sowohl mit der Hypothese vereinbar, dass er dem Vakuum eine aktiv ziehende Wirkung zuschreibt, als auch mit der, dass der Saft einfach von der Luft mit nach oben gezogen wird. Im ersten Teil seiner Antwort zu 7b wird diese Unklarheit nicht aufgelöst. Zusätzlich schreibt Dietmar dem Luftdruck von außen aber auch eine unterstützende Wirkung zu.

Diese beiden Antworten lassen also die Hypothese möglich erscheinen, dass Dietmar hier einen Mechanismus mit zwei Komponenten vertritt: Zum einen weist er dem Vakuum (bzw. dem Saft) eine aktiv ziehende Wirkung zu, zum anderen nimmt er zusätzlich an, dass der äußere Luftdruck eine in dieselbe Richtung wirkende Kraft ausübt. Allerdings wären unter der Annahme, dass Dietmar während der ganzen Untersuchung eines der beiden Konzepte (aktiv saugendes Vakuum oder den Saft mitziehende Luft) vertritt (und eine eventuelle Veränderung wahrscheinlich nur in Richtung einer passiven Rolle des Vakuums oder einer Flüssigkeit eintreten würde), spätere Äußerungen in Richtung einer der beiden Auffassungen ein Beleg dafür, dass er auch in der obigen Äußerung das entsprechende Konzept annimmt. Dietmar macht zwei Äußerungen beim zweiten Experiment

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

der Lernphase, der Diffusion von Brom, die eher für das Konzept des aktiv saugenden Vakuums sprechen:

„Jetzt wird die Luft da reingesogen.“

und

„Man sieht schön, wie durch den Unterdruck diese Gasteilchen rübergezogen werden und sich dann vermischen mit der restlichen Luft.“

Unter der Annahme, dass Dietmar sein Konzept der Vakuumwirkung im Verlauf dieser Untersuchung höchstens in Richtung einer passiven Wirkung verändert und ein eventuell unverändertes Konzept der aktiv saugenden Wirkung konsistent in allen Untersuchungsteilen vertritt, kann plausibel angenommen werden, dass er das Konzept des saugenden Vakuums beibehalten hat und es auch noch im zweiten Experiment der Lernphase benutzt. Hier zeigt sich also, dass die Präsentationsform der Animation nicht dazu geführt hat, dass Dietmar das Vakuum als passiv versteht. Dies könnte damit erklärt werden, dass die Animation keine Informationen liefert, die zu Dietmars Überzeugung von der aktiv saugenden Wirkung des Vakuums im Widerspruch stehen.

Dietmars Antworten zu Aufgabe 8

„Also, wenn man den so in der Hand hat, dann ist hier unten Luft in der Glocke. Und wenn man hier drauf drückt, dann wird die Luft ausgedrückt, und weil das Gummi versucht in seine Ursprungsform zurück zukommen, entsteht dann halt ein Vakuum und drinnen und der Saugnapf sitzt dann halt fest.“

„Das ist schwierig, weil da ein Vakuum ist und das Gummi auch dicht am Boden sitzt und dadurch keine Luft einströmen kann und dadurch ist es auch ein gewisser Kraftaufwand, das wieder los zu reißen.“

Auch die Äußerungen zu Aufgabe 8 lassen für sich genommen nicht klar erkennen, ob Dietmar eine aktiv saugende Wirkung des Vakuums annimmt. Allerdings lässt sich unter Geltung der oben genannten Voraussetzungen und Berücksichtigung von Dietmars Äußerungen zu Experiment 2 auch hier vermuten, dass er hier eine aktiv saugende Wirkung des Unterdrucks (Teilvakuums) annimmt..

Bis auf seine Sicht der Wirkung des Vakuums weisen Dietmars Äußerungen auf makroskopische Konzepte hin, die mit den wissenschaftlichen Sichtweisen gut vereinbar sind. Vor allem seine Auffassung vom Gewicht der Luft ist mit dem Teilchenkonzept der Gase gut vereinbar und lässt vermuten, dass er in der Lernphase das Partikelkonzept mit seinem makroskopischen Konzept verknüpfen kann.

Dietmars Äußerungen zu den beiden Experimenten

Experiment 1:

VP: „Wahrscheinlich sind die Teilchen, in die sich das Gas zerlegen soll, von dem Wasserstoff kleiner und können durch die Tonporen durch und kommen wahrscheinlich hier raus und die von Stickstoff sind wahrscheinlich größer und kommen nicht durch den Ton durch...“

VP: „Ja, wie gesagt, dass die Teilchengrößen von den verschiedenen Gasen unterschiedlich groß sind und dass gewisse Gase durch den Ton durch können.“

a) Makroskopische Inhalte und Inhalte des Teilchenmodells

Hier zeigt Dietmar, dass er die Teilchenvorstellung der Gase direkt nach den Demonstrationsexperimenten schon so modifiziert, dass er beiden Gasen unterschiedliche Teilchengrößen zuschreibt. Dies wird wahrscheinlich dadurch erleichtert, dass seine Vorstellungen von den makroskopischen Gaseigenschaften mit dem Teilchenmodell der Gase gut verträglich sind. Wie Carolin äußert Dietmar die Vorstellung, dass Gase in kleinste Teilchen zerlegt werden und nicht, dass diese Teilchen von Anfang an existieren. Man könnte seinen Nebensatz „Teilchen, in die sich das Gas zerlegen soll“ auch so interpretieren, dass er hier die Auffassung des Autors des Lernmaterials zur Kenntnis nimmt, dass sich das Gas in Teilchen zerlegt, ohne die diese Auffassung aber unbedingt selbst zu übernehmen. Auch hier spricht allerdings die Selbstverständlichkeit, mit der während des zweiten

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Experiments von Teilchen spricht und die Abwesenheit einer Äußerung, mit der er sich von der Teilchenvorstellung distanziert, dafür, dass er in der Untersuchung ziemlich einheitlich mit der Teilchenvorstellung der Materie argumentiert.

b) Metatheoretische Inhalte über Modelle und Experimente

Der genannte Nebensatz „Teilchen, in die sich das Gas zerlegen soll“ könnte als ein Hinweis darauf verstanden werden, dass Dietmar erkannt hat, dass er sich ein anderes Modell des Stoffaufbaus machen kann als der Autor des Lernmaterials und damit implizit eine Trennung zwischen Beobachtungs- und Modellebene aufgebaut hat. Allerdings finden sich in den weiteren Äußerungen Dietmars für diese Interpretation keine Belege mehr.

Zur Erkenntnismethodik des Experiments macht Dietmar keine Äußerungen.

Zusammenfassung

Dietmar erkennt eine Intention des Autors des Lernmaterials, dass die beiden Gase auf der Modellebene aus Teilchen verschiedener Größe bestehen, in die sich die Gase zerlegen. Wahrscheinlich akzeptiert er diese Vorstellung auch. Diese Vorstellung der Gase ist wahrscheinlich entstanden, indem Dietmar die Animationsdarstellung der Gasteilchen übernimmt und auf sein mentales Modell der Gase überträgt. Wiederum ist dies möglicherweise eine Übertragung eines umfangreichen Wissensbestandes aus der Quelle der Animationsdarstellung auf seine Stoffvorstellung.

Experiment 2:

“Also, ich geh eigentlich davon aus, dass alle Stoffe in kleinste Teilchen zerlegbar sind.“

VP: “Also man sieht, wie hier jetzt die Trennwand weggezogen wird. Und die Bromteilchen wandern nach da und die Luftteilchen nach da. Das wundert mich ein bisschen.”

VP: “Jetzt wird die Luft da reingesogen.“

VL: “Das ist das Experiment ohne abgesaugte Luft.”

VP: “Ohne? Stimmt ja...”

VP: “Ohne Abzug bin ich eigentlich davon ausgegangen, dass da gar nichts passiert. Weil, ja dass sich der Bereich ein bisschen vermischt, aber dass sich da groß was bewegt noch...”

VP: “Man sieht, die Bromteilchen wandern schneller nach links und die Luftteilchen bleiben eher da, wo sie sind. Das liegt wahrscheinlich daran, dass sich das Bromgas schneller ausdehnt.”

VP: “Das geht ja wieder zurück, das eine Teilchen...”

VP: “Man sieht schön, wie durch den Unterdruck diese Gasteilchen rübergezogen werden und sich dann vermischen mit der restlichen Luft.”

Makroskopische Inhalte und Inhalte des Teilchenmodells

Dietmar bestätigt hier zunächst, dass er eine Teilchenvorstellung der Gase akzeptiert, wobei die Teilchen allerdings durch Teilung aus den makroskopischen Gasen entstanden sind.

Bei der Erklärung des Versuchs unter Normalbedingungen erwartete er, dass sich ähnlich wie im makroskopischen Experiment, wo sich nur eine sehr kleine Veränderung gezeigt hatte, kaum eine Vermischung der Teilchensorten zeigt. Dietmar scheint eine Erklärung zu äußern, die weder mit dem makroskopischen Experiment noch mit der erklärenden Animation im Einklang zu stehen scheint, nämlich, dass weniger Wasserstoffteilchen (er meint, wahrscheinlich Luftteilchen) auf der einen Seite vorhanden seien, als Bromteilchen auf der anderen und deswegen die Bromteilchen stärker auf die andere Seite wandern.

Bei der Erklärung des Experiments mit dem teilevakuieren Behälter scheint Dietmar verwundert, dass sich ein Bromteilchen zunächst in die Luftbehälter und dann wieder zurückbewegt. Die nächste Äußerung kann diese Verwunderung erklären: Dietmar nimmt an, dass das Teilvakuum die Bromteilchen anzieht und sich deswegen die Teilchensorten mischen. Die analoge Annahme hatte er mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im Vorwissenstest gemacht, als er unterstellte, dass der Saft folge, wenn die Luft nach oben gesaugt werde. Auch hier legt für Dietmar die Animation nicht nahe, dass der Grund für die schnellere Durchmischung der Gasteilchen ist, dass durch die niedrigere Teilchendichte weniger Kollisionen stattfinden. Dietmar nimmt auch nicht wahr, dass die Bromteilchen bei ihrer Bewegung in die Luftbehälter nicht beschleunigt werden. Entweder weiß er noch nicht, dass eine stetig wirkende Kraft Teilchen beschleunigt oder er ignoriert Beobachtungen, die mit seinen Vorstellungen nicht übereinstimmen. Dieses Phänomen der Nichtwahrnehmung

von unpassenden Phänomenen bzw. ihrer Verdrängung, das unter das Stichwort des Umgangs mit anomalen Beobachtungsdaten fällt, wurde von Chinn & Brewer (1993) beschrieben.

Dietmar äußert in diesen Bemerkungen nichts, was darauf hinweist, dass er über die Rolle des Modells oder die Erkenntnismethodik des Experiments reflektiert. Seine Bemerkungen konzentrieren sich auf die Inhalte des Teilchenmodells, das in der Animation gezeigt wird.

Dietmar konzentriert sich in seinen Äußerungen auf die Inhalte der gezeigten Animation. Er äußert, dass er für das Experiment unter Normalbedingungen erwartete, dass eigentlich nicht viel passiert. Wahrscheinlich rechnete er nicht mit der Eigenbewegung der Gasteilchen in der Animation. Er nimmt dann eine - nicht existierende - stärkere Konzentration von Bromteilchen wahr und erklärt sich so, dass die Bromteilchen zu den Luftteilchen wandern, während er wahrscheinlich meint, dass dies in umgekehrter Richtung nicht passiert.

Im Versuch mit der Teilevakuierung zeigt sich, dass für Dietmar das Vakuum der wichtigste Agent im Versuch ist. Er nimmt zwar wahr, dass ein Bromteilchen zunächst auf die Seite mit den Luftteilchen wandert und dann wieder zurückkommt, bleibt aber dann kommentarlos bei seiner Deutung, dass das Vakuum die Bromteilchen auf die Seite zieht, die im Experiment teilevakuiert wurde.

Dietmars Äußerungen lassen sich wieder mit dem Mechanismus der Übertragung aus der Quelle der Animation in sein Stoffmodell erklären. Seine erste Äußerung macht deutlich, dass diese Übertragung vor allen Dingen den Teilchencharakter selbst betrifft. Dass Dietmar das Konzept des saugenden Vakuums behält und von der Bewegung der Gasteilchen im Versuch ohne Teilevakuierung überrascht ist, lässt sich damit erklären, dass er diese Vorstellungen beibehalten kann, nachdem er sein Stoffkonzept durch die Teilchenvorstellung angereichert hat. Die Vorstellungen, dass Teilchen durch Teilungen entstehen, das Vakuum auch in der Teilchenvorstellung saugend wirkt und wie am Anfang bemerkt, sich in ruhenden Gasen auch die Teilchen nicht bewegen, weisen auf Mischkonzepte hin, die durch analoge Übertragungen aus der Animation auf das mentale Teilchenmodell entstanden sind.

7.2.4 *Diskussion der Ergebnisse für die Untersuchungsziele und Konsequenzen für weitere Untersuchungen*

7.2.4.1 Methodische Konsequenzen für das Prä-Posttest Untersuchungsdesign

Die Untersuchung zeigte, dass zumindest die Items für den Prä- bzw. Posttest in dieser Form ungeeignet sind. Wahrscheinlich lag das daran, die Teilchenerklärung Brownschen Bewegung gegenüber der kontinuierlichen Erklärung so überzeugend war, dass die Aufgabe zu leicht wurde. Eine Entscheidung, ob das Prä-Posttest Design generell ungeeignet ist, kann deshalb hier noch nicht getroffen werden.

7.2.4.2 Ergebnisse des Vorwissenstests

Im Vorwissenstest zeigte sich, dass die Versuchspersonen Luft durchweg als einen Körper auffassten. Die meisten Versuchspersonen attribuierten der Luft Gewicht zu. Alle Versuchspersonen schrieben aber auch dem Vakuum eine aktiv saugende Wirkung zu und argumentierten deshalb, dass Luftdruckdifferenzen deshalb ausgeglichen würden, weil das Vakuum bzw. Teilvakuum umgebende Luft ansauge.

Dieses Ergebnis des Vorwissenstests ließ erwarten, dass die Versuchspersonen keine größeren Probleme mit den statischen Aspekten der Teilchenvorstellung von Gasen, wie deren Gewicht und Größe, haben würden. Die Ergebnisse des Vorwissenstests bezüglich des Vakuums warfen allerdings sofort die Frage auf, ob diese Alltagsvorstellungen nicht zwanglos in die Teilchenvorstellungen der Gase übernommen würden.

7.2.4.3 Ergebnisse der Lernphase und der Einfluss des makroskopischen Vorwissens

In der Lernphase zeigen sich bei den Versuchspersonen die erwarteten Effekte: Die statischen Eigenschaften der Gasteilchen wurden leicht angenommen, leicht wurden die Alltagsvorstellungen der Teilung von makroskopischen Gasen in kleinste Teilchen sowie eines aktiv saugenden Vakuums auf die Teilchenebene übertragen. Die Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass Alltagsvorstellungen des Stoffverhaltens dann auf die submikroskopische Ebene übertragen werden, wenn sie aus subjektiver Sicht widerspruchlos zum bisherigen Modellwissen passen.

Aus fachdidaktischer Sicht ergibt sich beim Zutreffen dieser Vermutung die Schwierigkeit, dass solche Übertragungen aus dem Alltagswissen wahrscheinlich solange immer wieder und fast unvermeidlich vorgenommen werden, bis der aktuelle Phänomenbereich mehr oder weniger komplett durch Modellbeziehungen mit einer entsprechend differenzierten Modellebene verbunden ist und zusätzlich das Metawissen über kritische Modellbildung gebildet ist.

7.2.4.4 Konsequenzen für weitere Untersuchungen

Die Untersuchung lässt vermuten, dass Bilder und Animationen durchaus geeignet sind, das Erlernen des Teilchenmodells der Gase zu unterstützen. Alle Versuchspersonen hatten wenig Probleme, die Existenz von Teilchen als Grundeinheit der Materie anzunehmen und mit ihnen nach dem Durcharbeiten der Lernbausteine im Rahmen der Testaufgaben zu argumentieren.

Eine wesentliche Aufgabe einer folgenden Untersuchung musste es sein, geeignete änderungssensitive Items für die Prä- und Posttests zu finden, um den Effekt der Konstruktionsumgebungen besser bestimmen zu können.

7.3 Untersuchung zur Gewinnung eines Itempools sowie zum Einfluss von Selbsterklärungen und Animationen auf den Lerneffekt

Diese Untersuchung wurde im Rahmen einer vom Autor betreuten Diplomarbeit (Brunner, 2000) durchgeführt. Die Themen, das Untersuchungsdesign und das computerbasierte Lern- und Auswertungsmaterial stammen vom Autor dieser Arbeit (die Untersuchungsoberfläche mit Benutzerführung und Testaufgaben wurde in Toolbook (Fa. Asymetrix) realisiert, die Teilchenmodellsimulationen mit Delphi (Borland)). Für die computerbasierte Version des Concept-Mapping standen NET (Eckert, 1998) und ein auf NET basierendes Toolbook-Programm von Thomas Sondermann zur Verfügung.

Die Untersuchung selbst sowie die Auswertung wurde von Marion Brunner im Rahmen ihrer Diplomarbeit (Brunner, 2000) am Psychologischen Institut der Universität Heidelberg durchgeführt.

7.3.1 Ziel der Untersuchung

Diese Untersuchung hatte 3 Hauptziele:

- Einen änderungssensitiven Itempool für weitere Untersuchungen mit Prä-Post-Design zu finden.
- Den Lerneffekt passiv rezipierter Animation beim Erlernen des Teilchenmodells zu überprüfen.
- Zwei weitere Einflussfaktoren auf das Lernen mit Animation zu untersuchen: Nämlich ob Selbsterklärungen (Chi et al., 1989) nach dem Betrachten einer ein makroskopisches Phänomen erklärenden Animation einen Lerneffekt für Lerninhalte zeigen, die inkompatibel zum

Vorwissen sind und ob der Lerneffekt durch die Darbietung mehrerer kurzer Animationssequenzen anstatt einer langen modifiziert wird. Durch Kreuzung dieser beiden Einflussfaktoren wurde auch deren Wechselwirkung untersucht.

7.3.2 *Methode*

7.3.2.1 Versuchspersonen

Die Untersuchung wurde 1999 mit Schülerinnen und Schülern der Gymnasien Sandhausen und Sinsheim in den beiden Schulen am Nachmittag außerhalb des Unterrichts durchgeführt. Jeder Versuchsperson stand dabei ein eigener Computer zur Verfügung, die Versuchspersonen arbeiteten zwischen 50 und 120 Minuten und wurden mit 10 DM für die Teilnahme entschädigt. Alle Untersuchten im Alter von 14-15 Jahren hatten zu diesem Zeitpunkt etwa 1 Jahr Chemieunterricht. Die Versuchspersonen wurden in 3 Durchgängen zu jeweils 6 Schülern am Nachmittag, nach dem regulären Unterricht, getestet.

7.3.2.2 Untersuchungsdesign

Wie oben schon erwähnt enthielt das Untersuchungsdesign 3 unabhängige Faktoren:

- Den Faktor „Lernaufgabe“
- Den Faktor „lernen mit Selbsterklärungen“
- Den Faktor „Darbietung der Animationen in mehreren Abschnitten“

Die Faktoren 2 und 3 wurden in 2 Stufen (Lernen mit/ohne Selbsterklärungen und Darbietung der Animationen in unterbrochener und in nicht unterbrochener Form) realisiert. Die beiden Lernaufgaben des ersten Faktors „Lernaufgabe“ wurde von allen Versuchspersonen realisiert. Vor und nach der Lernphase bearbeiteten die Versuchspersonen die Aufgaben des Prä- und Posttests.

Tabelle 7.2 verdeutlicht die Anlage dieser Untersuchung (horizontal: Untersuchungsgruppen mit den 4 Kombinationen der Faktoren 2 und 3; vertikal Phasen des Untersuchungsablaufs):

7.3.2.3 Operationalisierung

Vorwissensaufgaben

Um das Vorwissensniveau der Probandinnen und Probanden zu überprüfen, wurde es zu Anfang der Untersuchung mit einem kurzen Test überprüft. Es sollte mit einigen Items, die sich an bekannten empirischen Untersuchungen orientierten (z.B. Driver et.al, 1989) überprüft werden, ob das bisherige Wissen der Versuchspersonen kompatibel ist mit dem wissenschaftlichen Teilchenmodell oder ob Alltagskonzeptionen vorliegen, die aus der empirischen Literatur bekannt sind und den Erwerb des Teilchenmodells behindern können.

Der elektronische Fragebogen startet dazu mit acht allgemeinen zu beurteilenden Aussagen bezüglich grundlegender Vorstellungen zu chemischen Stoffen der Schülerinnen und Schüler, die nicht direkt in den Lernaufgaben angesprochen werden.

Die Aussagen (und alle folgenden Aussagebeurteilungen in dieser Untersuchung) sollten bezüglich der Sicherheit beurteilt werden, mit der die Versuchsperson sie als richtig oder falsch bewerten. Dazu klickten die Versuchspersonen eine von 4 Antwortalternativen an. In Abbildung 7.5 ist eine Aussage mit den Antwortalternativen abgebildet:

Folgende allgemeine Aussagen wurden zur Beurteilung vor der Lernphase vorgelegt:

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Untersuchungsphase	Gruppe 1 (ohne Selbsterklärungen ohne Animationspausen)	Gruppe 2 (ohne Selbsterklärungen mit Animationspausen)	Gruppe 3 (mit Selbsterklärungen ohne Animationspausen)	Gruppe 4 (ohne Selbsterklärungen mit Animationspausen)
1. Vorwissenstest (für alle Gruppen gleich)	Allgemeine Aufgaben zum Teilchenmodell			
2. Prätest (für alle Gruppen gleich)	1. Druckverhältnisse bei der Magdeburger Kugel (Verhältnisse anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Volleyballs (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Diffusion zweier Farbstoffe durch einen Dialyseschlauch (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei der Magdeburger Kugel (Verhältnisse anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Volleyballs (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Diffusion zweier Farbstoffe durch einen Dialyseschlauch (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei der Magdeburger Kugel (Verhältnisse anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Volleyballs (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Diffusion zweier Farbstoffe durch einen Dialyseschlauch (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei der Magdeburger Kugel (Verhältnisse anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Volleyballs (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Diffusion zweier Farbstoffe durch einen Dialyseschlauch (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)
3. Lernphase (für alle Gruppen gleich)	Lernen ohne Selbsterklärungen und mit nicht unterbrochenen Animationen 1. Diffusion von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Thermische Expansion von Luft in einem Kolbenprober	Lernen ohne Selbsterklärungen und mit nicht unterbrochenen Animationen 1. Diffusion von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Thermische Expansion von Luft in einem Kolbenprober	Lernen mit Selbsterklärungen und mit nicht unterbrochenen Animationen 1. Diffusion von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Thermische Expansion von Luft in einem Kolbenprober	Lernen mit Selbsterklärungen und mit nicht unterbrochenen Animationen 1. Diffusion von Wasserstoff und Stickstoff durch Ton 2. Thermische Expansion von Luft in einem Kolbenprober
4. Posttest (für alle Gruppen gleich)	1. Druckverhältnisse bei einem Saugnapf (anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Fahrradreifens (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Blutdialyse (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei einem Saugnapf (anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Fahrradreifens (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Blutdialyse (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei einem Saugnapf (anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Fahrradreifens (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Blutdialyse (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)	1. Druckverhältnisse bei einem Saugnapf (anhand schematischer Skizzen bewerten, Aussagen bewerten) 2. Thermische Expansion beim Abkühlen eines Fahrradreifens (Concept Map, Aussagen bewerten) 3. Blutdialyse (Aussagen gruppieren, Aussagen bewerten)

Tabelle 7.2: Versuchsdesign der Studie 2

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Die kleinsten Teilchen der Luft in einem geschlossenen Behälter sind bewegungslos.	richtig <input type="radio"/> ich bin mir sicher <input type="radio"/> ich bin mir unsicher
	falsch <input type="radio"/> ich bin mir sicher <input type="radio"/> ich bin mir unsicher

Abbildung 7.3: Antwortformat der Beurteilung einer Aussage

Die kleinste Einheit von Wasser ist ein Wassertropfen.
Luft besteht aus nichts.
Luft besteht aus kleinsten Teilchen.
Der Zwischenraum zwischen den kleinsten Teilchen eines Gases ist leer.
Die kleinsten Teilchen lösen sich in Wasser auf.
Wenn ich aus einem Behälter die Luft entferne, dann befindet sich in diesem Behälter überhaupt nichts mehr.
Die kleinsten Teilchen eines Gases sind von Luft umgeben.
Wenn ich aus einem Behälter die Luft herausnehme, dann befindet sich in dem Behälter immer noch etwas, was vorher den Raum zwischen den Teilchen ausgefüllt hat.
Die kleinsten Teilchen lösen sich in Wasser auf.

Realisierung der unabhängigen Variablen

Faktor Lernaufgabe

Für diesen Faktor wurden 2 Aufgaben ausgewählt, die in der kognitiven Aufgabenanalyse analysiert wurden: zunächst die „Diffusion“ eines Gases durch einen Tonzyylinder und die im letzten Abschnitt erwähnte thermische Expansion von Luft in einem Kolbenprober.

Experiment zur „Diffusion“ von Wasserstoff bzw. Stickstoff durch einen Tonzyylinder

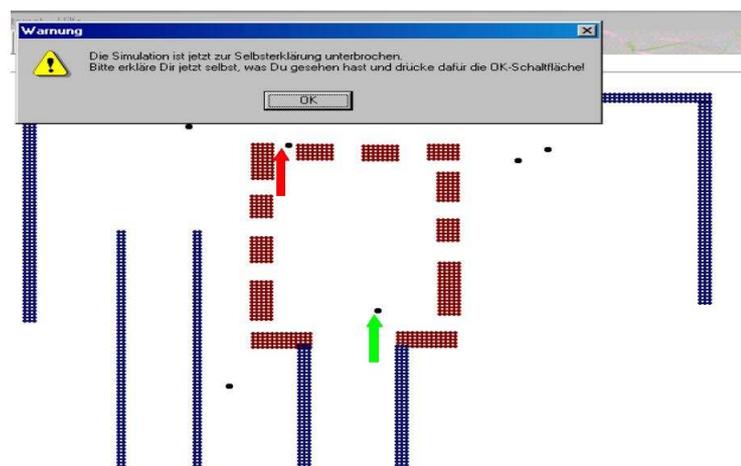


Abbildung 7.4: Schnappschuss aus der Animation der „Diffusion“ von Wasserstoff durch einen Tonzyylinder

Nach einer Einführung konnten sich die Versuchspersonen in der Lernphase jeweils eine Animation des makroskopischen Experiments und danach eine ca. $3\frac{1}{2}$ -minütige Simulation ansehen,

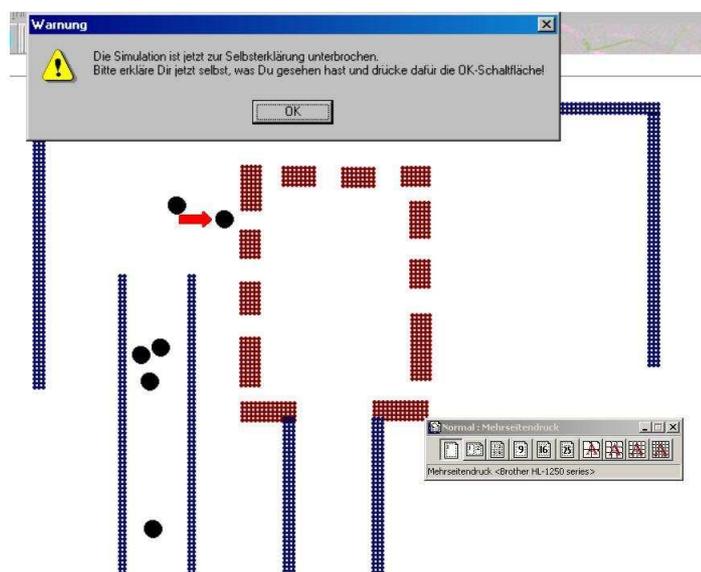


Abbildung 7.5: Schnappschuss aus der Animation der „Diffusion“ von Stickstoff durch einen Tonzylinder

die zeigte, wie Wasserstoff- bzw. Stickstoffgas durch ein Rohr unter einen Glasbecher strömt, der auf dem Kopf steht. Unter diesem Glasbecher befindet sich ein Tonzylinder, der ebenfalls auf dem Kopf steht und in dessen Öffnung ein dicht schließender Gummistopfen steckt. In der Öffnung des Gummistopfens steckt ein Glasrohr, das in eine mit Wasser gefüllte Wanne führt. Dieser Versuchsaufbau und -ablauf wird den Versuchspersonen in einer Grafik präsentiert. Es folgen Animationen der beiden makroskopischen Experimente (mit den Gasen Wasserstoff und Stickstoff). Anschließend konnten die Versuchspersonen die erklärende Simulation des Versuchs auf Teilchenebene starten. Personen, die in Bedingungen mit hoher Granularität, also ohne Unterbrechungen der Simulationen, sind, sehen die Simulation ohne Pausen. Bei Versuchspersonen in den Bedingungen mit niedriger Granularität wurde die Simulation jeweils 3-5mal ca. alle 30 Sekunden unterbrochen. Die Simulation wurde nach 30 s automatisch in der nächsten Situation gestoppt, in der ein Wasserstoffteilchen durch die Öffnungen hindurch in den Tonzylinder und so in die Wasserwanne gelangt. Diese Unterbrechungen zeigen den Schülern in einer statischen Abbildung, warum einzelne Teilchen durch den Ton dringen können. Die Versuchspersonen werden vom Programm unmittelbar nach dem Anhalten des Versuchsablaufs zur Selbsterklärung aufgefordert. Der Zeitraum, der für die Selbsterklärungen zur Verfügung steht, blieb den Versuchspersonen selbst überlassen, was erklärt, warum einige Versuchspersonen lediglich drei, andere bis zu fünf Unterbrechungen der Simulation hatten. Die Dauer der Selbsterklärungen wird von Programm gemessen und von der weiteren Simulationszeit abgezogen, da sonst die Personen mit Unterbrechungen einen Zeitvorteil haben würden. Entsprechend der „Wasserstoffdiffusion“ wird auch die „Stickstoffdiffusion“ an relevanten Stellen gestoppt. Diesmal wird gezeigt, dass die Teilchen des Stickstoffs zu groß sind, um durch die Öffnungen des Tonzylinders und somit in das Wasser zu gelangen.

Experiment zur thermischen Luftexpansion

Die zweite Aufgabe der Lernphase beinhaltet das Phänomen der thermischen Gasexpansion: Zunächst sehen die Schüler eine Videoaufnahme einer elektrisch beheizbaren Glasspritze, die erwärmt wird. Die nachbearbeitete Aufnahme eines realen Experiments zeigt, wie der Kolben der Spritze nach außen gedrückt wird und schließlich stehen bleibt.

Die folgende Simulation gibt wieder eine Erklärung auf der Teilchenebene.

Auch bei der Spritzensimulation wurden Unterbrechungen an relevanten Stellen vorgenommen:

zunächst einmal vor der Erwärmung und mehrere Male nach der Erwärmung, wenn eines oder beide Teilchen im Inneren der Spritze gegen die Kolbenwand stoßen.

Selbsterklärungsfaktor

Zur Realisierung des Faktors Selbsterklärung wurden zufällig (d.h. abwechselnd je nach ihrem Eintreffen zur Untersuchung) zwei Gruppen gebildet: eine ohne und mit Aufforderung zur Selbsterklärung. Die Versuchspersonen der Gruppe mit Selbsterklärung werden während der Lernphase mehrere Male per Bildschirminformation zum lauten Denken aufgefordert und gegebenenfalls auch durch die Versuchsleiter dazu angehalten. Diese Aufforderungen fehlen in der Gruppe ohne Selbsterklärung.

Faktor der zeitlichen Granularität der Animation

Die Versuchspersonen wurden zur Realisierung dieses Faktors nach dem oben erwähnten Verfahren ebenfalls zufällig in zwei Gruppen eingeteilt: Die Gruppe mit mehreren zeitlich unterbrochenen Animationseinheiten (niedriger zeitlicher Granularität) sah die Computersimulationen in der Lernphase mit Unterbrechungen, die Gruppe mit hoher Granularität ohne Unterbrechungen.

Realisierung der abhängigen Variablen

Da es ein zusätzliches Ziel dieser Untersuchung war, geeignete änderungssensitive Untersuchungssitems zu gewinnen, wurden für diese Untersuchung mehrere Itemformen eingesetzt: Rechnergestützter Fragebogen, Concept-mappings, Gruppierung von Aussagen sowie die Beurteilung von grafisch dargestellten Teilchenerklärungen.

Die Untersuchung des Lerneffekts für beide Lernaufgaben mit allen Aufgabentypen hätte für die Versuchspersonen eine zu lange Untersuchungszeit bedeutet. Deshalb wurden die Fragebogenitems zwar für alle Aufgaben angewendet, Concept-Mapping, Gruppierungsaufgaben und Beurteilung grafisch dargestellter Teilchenerklärungen aber jeweils nur bei einer der 3 Aufgaben des Prä- bzw. Posttests angewendet.

Die abhängigen Variablen beinhalten damit also folgende Itemtypen:

- die Antworten der Versuchspersonen auf die Fragen des elektronischen Fragebogens im Prä- und Posttest
- die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeitszuordnungen, des concept-mappings und der Gruppierungsaufgaben im Prä- und Posttest
- die Äußerungen Lauten Denkens zu den Aufgaben

Vorgehen zur Konstruktion änderungssensitiver Testaufgaben Um ein änderungssensitives Testinstrumentarium zu gewinnen, wurden neben einer Reihe allgemeiner Beurteilungssitems zum Teilchenmodell 3 Aufgabentypen ausgewählt: Testaufgaben zur Druckdifferenz, Testaufgaben zur thermischen Luftexpansion (bzw. Luftkontraktion) und Testaufgaben zur Diffusion. Um Wiederholungseffekte zu minimieren, wurden zu jedem Aufgabentyp je 2 Aufgaben konstruiert, die sich in ihrer Tiefenstruktur entsprachen, sich hinsichtlich ihrer Oberflächenstruktur unterschieden.

- Bei den Aufgaben zur Druckdifferenz wurde für den Prätest eine Aufgabe zu den Magdeburger Kugeln konstruiert, für den Posttest eine Aufgabe zu einem Saugnapf.
- Bei den Aufgaben zur thermischen Luftexpansion (bzw. -kontraktion) wurde eine Aufgabe zur thermischen Luftkontraktion in einem Volleyball für den Prätest, für den Posttest eine Aufgabe zur thermischen Luftkontraktion in einem Fahrradreifen erstellt.
- Für den Aufgabentyp der Diffusion wurde für den Prätest eine Aufgabe zur Farbstoffdiffusion durch ein Membran, für den Posttest eine Aufgabe zur Nierendialyse konstruiert.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Für jeden Aufgabentyp wurden für Prä- und Posttest Testaufgaben erstellt, die sich nur durch einige Oberflächenanpassungen an die nur oberflächlich unterschiedlichen Aufgaben unterscheiden. Die allgemeinen Beurteilungssitems zum Teilchenmodell wurden von den Versuchspersonen vor und nach dem Test in identischer Form bearbeitet.

Die einzelnen Prä- und Posttest-Aufgaben

Nach der Bearbeitung der Vorwissensfragen werden die Versuchspersonen darauf hingewiesen, bei der Beantwortung der kommenden Fragen davon auszugehen, dass alle Stoffe aus kleinsten Teilchen bestehen. Der Teil „Allgemeine Fragen zu chemischen Stoffen“ beinhaltet 30 allgemeine Fragen zu Themen auf der Teilchenebene, die relativ direkt von den Lernaufgaben angesprochen werden:

-
- Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich ständig unabhängig voneinander.
 - Zwischen den kleinsten Teilchen von Luft befindet sich ein gasförmiger Stoff.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases können ihre Form verändern.
 - Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases gegen ein Hindernis treffen, zerbrechen sie.
 - Ich kann die kleinsten Teilchen eines Gases unter dem Mikroskop sehen.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich ständig.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases spalten sich manchmal in Bruchteile auf.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich dicht beieinander.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases können größer werden.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases sind lebendig wie kleine Ameisen.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases durchdringen sich gegenseitig, wenn sie aufeinander treffen.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases ändern aus eigener Kraft ihre Fortbewegungsrichtung wie Mücken.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich mit der Zeit immer langsamer.
 - Zwei kleinste Teilchen eines Gases verformen sich beim Zusammenprall elastisch wie Gummibälle.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich weit voneinander entfernt.
 - Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases zusammenprallen, verändern sie dadurch ihre Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases sind kugelförmig.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases verformen sich so, dass sie zusammen lückenlos einen Raum ausfüllen.
 - Die kleinsten Teilchen der Luft in einem geschlossenen Behälter sind bewegungslos.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases behalten ihre Größe bei.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich mit der Zeit immer schneller.
 - Wenn kleinste Teilchen eines Gases auf einen Gegenstand treffen, üben sie einen Druck auf den Gegenstand aus.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases passen überall hindurch.
 - Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases auf einen Gegenstand treffen, dringen sie hindurch.
 - Wenn zwei kleinste Teilchen eines Gases aus entgegengesetzten Richtungen auf einen Gegenstand treffen, heben sich die Wirkungen dieser beiden Kollisionen auf.
 - Je schneller ein kleinstes Teilchen eines Gases ist, desto mehr Druck übt es beim Zusammenprall mit etwas anderem aus.
 - Zwei kleinste Teilchen eines Gases verformen sich beim Zusammenprall dauerhaft wie Knetmasse.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases bleiben auf einer Stelle stehen.
 - Die kleinsten Teilchen eines Gases können sich auflösen.
 - Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases gegen einen Gegenstand stoßen, verändern sie ihre Bewegungsrichtung.
-

Mithilfe solcher Fragen kann überprüft werden, ob im mentalen Teilchenmodell der Versuchspersonen die angesprochenen Aspekte vertreten sind (wobei keine Aussagen über die Verknüpfung der Aussagen gemacht werden). Ungefähr die Hälfte der Fragen sind naturwissenschaftlich korrekt, die andere Hälfte ist mit „falsch“ zu beantworten (und wird in der Auswertung entsprechend umgepolt). Die identischen Fragen werden den Versuchspersonen nochmals direkt nach der Lernphase gestellt, um eventuelle Fortschritte überprüfen zu können.

Prä- und Posttestaufgaben zum Luftdruck mit Aufgaben zu Magdeburger Kugeln und Saugnapf (Wahrscheinlichkeit)

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

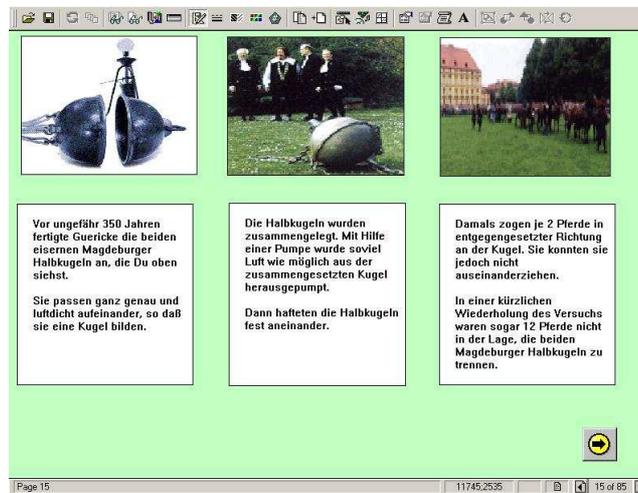


Abbildung 7.6: Prätestaufgabe zum Luftdruck (Magdeburger Kugel)



Abbildung 7.7: Posttestaufgabe zum Luftdruck (Saugnapfaufgabe)

Die Untersuchung beinhaltet zwei Aufgaben, die sich in analoger Weise mit Luftdruck befassen: die Magdeburger Kugeln (im Prätest) und die Saugnapf-Aufgabe (im Posttest). Die entsprechenden Experimente werden zunächst mit Hilfe von Bildern und einer kurzen Beschreibung erläutert (siehe Abbildungen 14 und 15). Die Posttestaufgabe unterscheidet sich oberflächlich von der Prätestaufgabe, um einfache Lerneffekte aufgrund der Wiederholung einer identischen Testaufgabe zu vermeiden. Die Aufgaben ähneln sich aber in der Tiefenstruktur.

Anschließend werden den Versuchspersonen im Prä- und im Posttest 8 vorgefertigte schematisierte Bilder der Experimente am Bildschirm gezeigt, wobei sich die Abbildungen von Prä- und Posttest entsprechen und nur an die unterschiedlichen Behälterformen angepasst sind. Die Aufgabe ist es, jeweils pro Bild anzugeben, für wie wahrscheinlich die Versuchspersonen die dargestellte Erklärung halten. Als mögliche Antworten kommen „sehr wahrscheinlich“, „wahrscheinlich“, „unwahrscheinlich“ oder „sehr unwahrscheinlich“ in Frage. Pro Seite werden zwei Bilder gezeigt. Die folgende Abbildung zeigt eine Seite mit einer (idealisierten) richtigen Lösung und einer falschen Lösung:

Danach waren 10 Aussagen zu diesen Experimenten mit „richtig“ oder „falsch“ zu beurteilen. Die Aussagen boten ebenfalls Erklärungsmöglichkeiten für die Magdeburger Kugeln und wurden in

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Posttest analog für die Saugnapfaufgabe wiederholt. Sie werden im Folgenden aufgeführt:

Ein Vakuum innerhalb der Kugel hält die beiden Kugelhälften zusammen.

Das Vakuum in der Magdeburger Kugel macht die kleinsten Teilchen der Luft langsamer.

Wenn die kleinsten Teilchen der Luft von außen gegen die Kugel prallen, werden die beiden Halbkugeln zusammengedrückt.

Die Halbkugeln werden zusammengedrückt, weil nach dem Entfernen der Luft weniger kleinste Teilchen in der Kugel sind.

Die kleinsten Teilchen der Luft innerhalb der Kugel stoßen die beiden Halbkugeln auseinander, wenn sie von innen gegen sie prallen.

Wenn Luft aus der Kugel herausgesogen wird, dann schrumpfen die kleinsten Teilchen der Luft im Inneren zusammen.

Wenn Luft aus der Kugel entfernt wurde, dann werden die restlichen kleinsten Teilchen der Luft in der Kugel langsamer.

Die Kugel wird zusammengedrückt, weil nach dem Entfernen der Luft mehr Teilchen von außen als von innen gegen die Kugel prallen.

Wenn etwas Luft aus der Magdeburger Kugel entfernt ist, dann saugt die restliche verdünnte Luft die Halbkugeln zusammen.

Die Luft der Umgebung drückt die Magdeburger Kugel zusammen.

Prä- und Posttest zur thermischen Luftexpansion mit Volleyball- und Fahrradreifenaufgabe (Concept Mapping und Fragen)

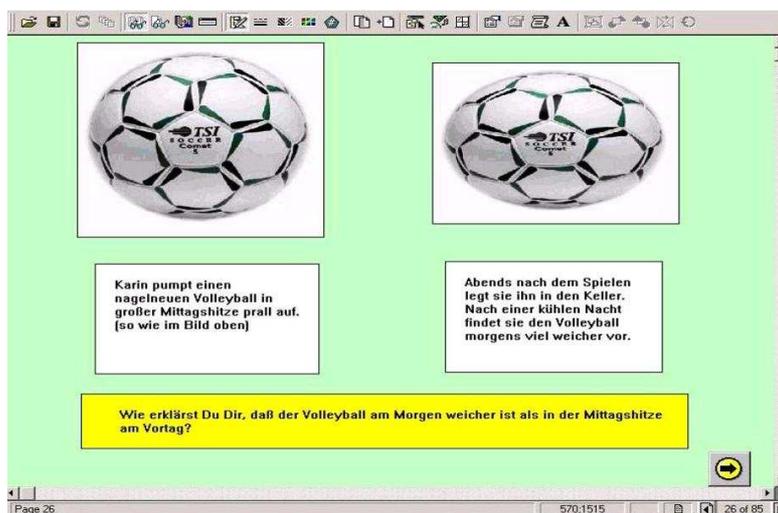


Abbildung 7.8: Prätestaufgabe zur thermischen Luftexpansion (Volleyballaufgabe)

Vor der Prätestaufgabe wurde erklärt, was concept-mapping ist, wie es funktioniert und welche Möglichkeiten es bietet. Anschließend folgte eine Darstellung der Aufgaben „Volleyball“ im Prättest bzw. „Fahrradreifen“ im Posttest, die mithilfe dieses Verfahrens beantwortet werden sollen.

Das concept-mapping beinhaltet das Anordnen von vorgegebenen Begriffen auf Papier oder dem Computerbildschirm. In vorliegenden Fall befanden sich die Begriffe auf (virtuellen) Kärtchen und werden, nachdem sie gelegt wurden, mit Pfeilen verbunden. Diese Pfeile zeigen an, in welcher Relation die Begriffe zueinander stehen und geben die logische Richtung, bzw. auch die zeitliche Reihenfolge an. Weitere Informationen liefert diese Technik, wenn die Versuchspersonen die Verbindungslinien beschriften. In dieser Untersuchung wurde ein spezielles concept-mapping Verfahren, das Netzwerk Elaborierungs Technik (NET) von Andreas Eckert. (1998) verwendet. Mit dieser computerbasierten Strukturlegetechnik können konzeptuelle Wissensstrukturen erfasst werden. NET bietet die Möglichkeit, die Netze der Versuchspersonen gegen Referenznetzwerke mit korrekten Lösungen zu vergleichen und die Ähnlichkeit in Korrespondenzindices zu fassen.

Aus Platzgründen wird an dieser Stelle nur die Volleyball-Aufgabe des Prättests einer genauen

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

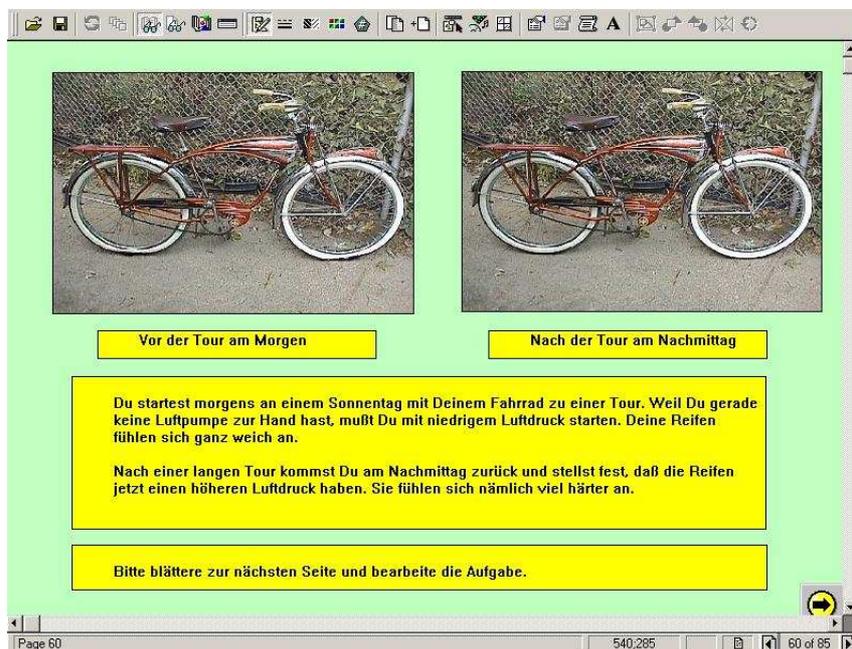


Abbildung 7.9: Posttestaufgabe zur thermischen Luftexpansion (Fahrradreifenaufgabe)

Betrachtung unterzogen (wie bei den anderen Aufgaben ist die Fahrrad-Aufgabe analog).

Die Volleyball-Aufgabe wird den Schülern auf dem Bildschirm wie in Abbildung 7.8 präsentiert: Es stehen 17 Kärtchen mit Begriffen zur Verfügung und 3 Beschriftungsmöglichkeiten für die Verbindungspfeile (die Kärtchen werden hier durch grüne und gelbe Farbgebung unterschieden, in der Untersuchung aber farblich einheitlich dargeboten):

Als Relationspfeile standen zur Verfügung:

- verursacht
- ist Teil von
- entspricht

Die gelben Karten beziehen sich alle auf die makroskopische Ebene, die grünen auf die submikroskopische Ebene. Wie die Expertenlösung (siehe Abbildung 7.11) zeigt, werden die verschiedenen Ebenen mit der Relation „entspricht“ miteinander in Verbindung gesetzt. Kausale Zusammenhänge innerhalb einer Ebene werden mit der Relation „verursacht“ dargestellt. Die Relation „ist Teil von“ bietet die Möglichkeit an, Teilchen als Teil eines makroskopischen Stoffes darzustellen. Diese Relation sollte vor allem für den Fall Maps ermöglichen, in dem Versuchspersonen noch nicht konsequent zwischen makroskopischer und hypothetischer, submikroskopischer Ebene unterschieden. Es existieren *zwei* Lösungsmöglichkeiten für diese Aufgabe, da viele der Versuchspersonen nicht nur die eigentliche Aufgabenstellung - Expertenlösung I- (“Warum ist der Ball am nächsten Morgen weicher als in der Mittagshitze am Vortag?”) beantwortet haben, sondern noch zusätzlich, wie sich der Ball bei Wärme verhält -Expertenlösung II-, die ebenfalls abgebildet ist.

Im Anschluss an das concept-mapping waren auch bei diesen Aufgaben folgende Aussagen zu beurteilen (hier sind die Aussagen zur Volleyballaufgabe aufgeführt, die Aussagen zur Fahrradaufgabe sind analog):

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Kälte	Viele Kollisionen	Hoher Luftdruck	Luft außen	Kleinere Teilchen
Wärme	Schwache Kollisionen	Ball ist hart	Ball ist schlaff	Kleinste Teilchen
Langsame Bewegung	Starke Kollisionen	Luft innen	Größere Teilchen	Wenige Kollisionen
Schnelle Bewegung	Niedriger Luftdruck			

Abbildung 7.10: Begriffskärtchen zum Concept-Mapping der thermischen Luftexpansion

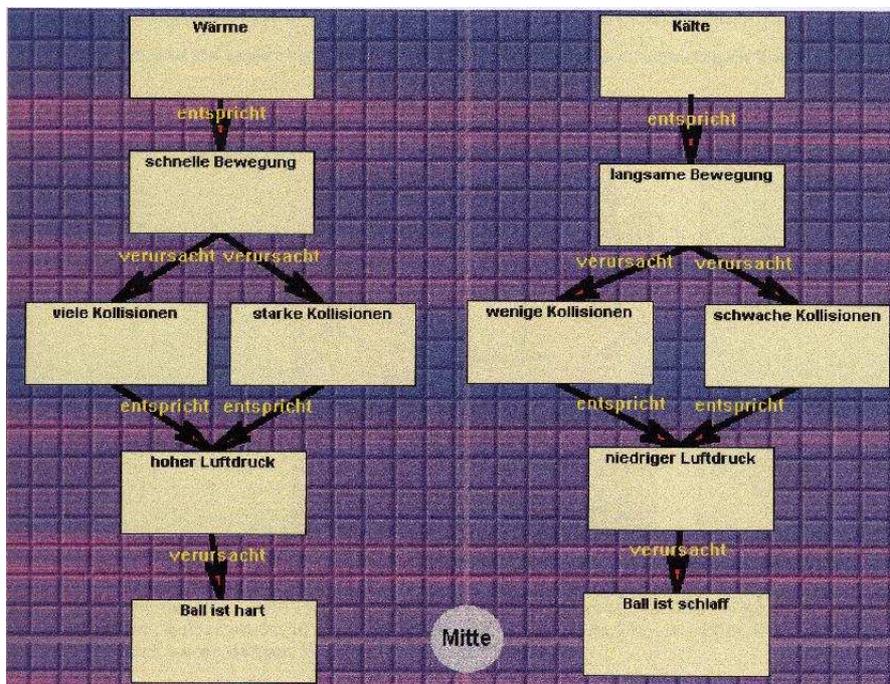


Abbildung 7.11: Expertenmapping zur Volleyballaufgabe

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Heiße Luft nimmt im Ball einen größeren Raum ein als kalte Luft, weil die kleinsten Teilchen der heißen Luft größer sind.

Wenn die Luft abgekühlt wird, stoßen die kleinsten Teilchen der Luft nicht so stark gegen die Wände des Balls, weil sich die Teilchen schwächer gegenseitig voneinander abstoßen.

Wenn die Luft im Ball erwärmt wird, dann kollidieren die kleinsten Teilchen der Luft heftiger miteinander, weil ihre Geschwindigkeit größer wird.

Kalte Luft nimmt im Ball weniger Raum ein als heiße Luft, weil die kleinsten Teilchen der kalten Luft kleiner sind als die der heißen Luft.

Luft benötigt in einem Ball keinen Platz und kann deshalb soweit zusammengedrückt werden, dass sie keinen Raum mehr einnimmt.

Wenn Luft abgekühlt wird, werden die kleinsten Teilchen der Luft kälter.

Wenn Luft im Ball abgekühlt wird, bleibt die Temperatur der kleinsten Teilchen der Luft gleich.

Wenn die Luft im Ball abkühlt, dann kollidieren die kleinsten Teilchen der Luft schwächer miteinander, weil ihre Geschwindigkeit kleiner wird.

Wenn die Luft erwärmt wird, dringen neue kleinste Teilchen in den Ball ein.

Wenn Luft abgekühlt wird, stoßen sich die Luftteilchen gegenseitig nicht mehr so stark ab, sodass die Teilchen näher zueinander kommen.

Wenn die Luft erwärmt wird, werden die kleinsten Teilchen langsamer.

Wenn die Luft abgekühlt wird, dann bleibt die Geschwindigkeit der kleinsten Teilchen gleich.

Wenn Luft erwärmt wird, wirken abstoßende Kräfte zwischen den kleinsten Teilchen, sodass die Teilchen sich voneinander entfernen.

Wenn die Luft erwärmt wird, dann wird der Ball größer, weil die Teilchen mit größerer Geschwindigkeit gegen die Ballwand stoßen.

Wenn Luft im Ball erhitzt wird, werden die kleinsten Teilchen der Luft heißer.

Wenn die Luft abkühlt, dann wird der Ball kleiner, weil die Teilchen der Luft mit kleinerer Geschwindigkeit gegen die Ballwand stoßen.

Die Luft in einem Behälter drückt von innen gegen die Behälterwände.

Wenn der Ball heißer wird, dringt mehr Luft in den Ball ein.

Wenn Luft abgekühlt wird, werden die kleinsten Teilchen der Luft langsamer.

Wenn Luft erwärmt wird, stoßen die kleinsten Teilchen der Luft stärker gegen die Wände des Balls, weil sich die Teilchen gegenseitig stärker voneinander abstoßen.

Wenn die Luft abkühlt, verliert der Ball kleinste Teilchen der Luft und wird deshalb schlaffer.

Heiße Luft übt einen stärkeren Druck auf einen Behälter aus als kalte Luft.

Die kleinsten Teilchen der Luft werden schneller, wenn die Luft erwärmt wird.

Prä- und Posttest zu Diffusionsaufgaben anhand Farbstoffdiffusion und Dialyse (Gruppierung und Fragen)

Auch diese zwei Aufgaben sind nahe Analogien zueinander und zur Lernaufgabe, die beide das Phänomen der Diffusion behandeln. Im Prätest bearbeiten die Versuchspersonen die Aufgabe mit den Farbstoffen, im Posttest die Dialyseaufgabe. Die Aufgaben wurden den Versuchspersonen mit den Abbildungen 7.12 und 7.13 präsentiert.

Anschließend sollten die Versuchspersonen in der gleichen Computerumgebung, in der zuvor die Concept-Mapping-Aufgaben zu bearbeiten waren, bestimmte vorgefertigte Kärtchen nach subjektiv wahrgenommener Ähnlichkeit zu gruppieren. Leider traten bei der Durchführung dieser Aufgabe technische Probleme auf, weswegen sie letztlich kaum interpretierbar ist und hier nicht weiter beschrieben wird.

Danach sind auch hier Aussagen zur Erklärung des Experiments nach ihrer Zutreffenswahrscheinlichkeit zu beurteilen. Im Folgenden werden wieder die Aussagen zur Farbstoffdiffusion aufgeführt (sie wurden im Posttest wieder durch Objektaustausch an den analogen Versuch zur Nierenanalyse angepasst):

Die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs sind zu hart, um an der Schlauchwand zu zerbrechen.

Die kleinsten Teilchen des lila Farbstoffs können sich durch die Schlauchporen zwängen, indem sie ihre Form verändern.

Die kleinsten Teilchen des lila Farbstoffs sind kleiner als die des gelben Farbstoffs und gelangen deshalb nach außen.

Der lila Farbstoff wird vom Wasser außen angesaugt.

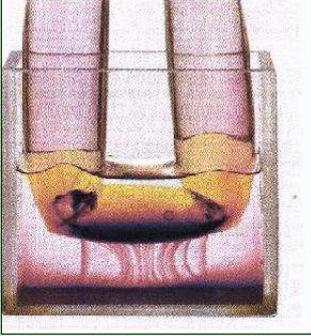
Die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs sind zu langsam, um durch den Schlauch zu gelangen.

Der gelbe Farbstoff wird vom Wasser abgestoßen.

Der hohe Druck im Schlauchinnern drückt die lila Teilchen nach außen.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Ein lila und ein gelber Farbstoff gelöst in Wasser in einem durchsichtigen Kunststoffschlauch.



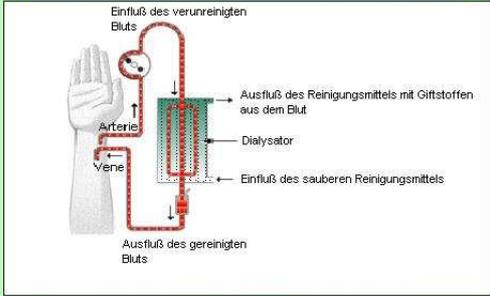
Im Experiment, dessen Photo Du oben siehst, wurde Wasser, in dem ein gelber und ein lila Farbstoff gelöst wurde, in einen durchsichtigen Kunststoffschlauch gefüllt. Der gefüllte Schlauch wurde danach in ein Wasserbecken getaucht.

Du kannst sehen, daß sich der lila Farbstoff im ganzen Wasserbecken verteilt, während der gelbe Farbstoff in dem Kunststoffschlauch bleibt. Bitte blättere weiter, um einige Aufgaben zu diesem Experiment zu bearbeiten.

Page 35 30.675 35 of 85

Abbildung 7.12: Aufgabe zur Farbstoffdiffusion

Nierendialyse: Reinigung des Bluts bei Nierenversagen



Wenn die Nieren versagen, ist in regelmäßigen Abständen eine Blutwäsche notwendig, um Giftstoffe aus dem Blut zu entfernen.

Blut wird aus einer Arterie entnommen und über Schläuche und Pumpen in den Dialysator geleitet und dort gereinigt.

In den Dialysator wird neben dem verunreinigten Blut auch ein Reinigungsmittel geleitet. Das Blut und das Reinigungsmittel fließen während der Dialyse, getrennt durch eine Membran im Dialysator, aneinander vorbei. Das Reinigungsmittel strömt auf einer Seite des Dialysators zusammen mit den Giftstoffen wieder aus, auf der anderen Seite wird das gereinigte Blut zurück in den Körper geleitet.

Bitte blättere weiter und bearbeite die Aufgaben zur Nierendialyse.

Page 68 120.2055 68 of 85

Abbildung 7.13: Posttest: Dialyseaufgabe

Der Druck des Wassers außerhalb des Schlauchs drückt die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs in den Schlauch zurück.

Es werden verschiedene „falsche“ und „richtige“ Erklärungen für das Experiment dargeboten, die alle das, was auf der Beobachtungsebene zu sehen ist, erklären können. So kann überprüft werden, welches Konzept die Schüler bezüglich des Phänomens Diffusion haben, jeweils vor und nach der Lernphase.

Selbsterklärungen

Die verbalen Selbsterklärungsäußerungen der Versuchspersonen während der Lernphase werden per Videogerät aufgenommen. Diese Daten werden transkribiert und kategorisiert. Diese Kategorisierung erfolgt folgendermaßen:

- Kategorisierungen für inhaltliche (das Lernmaterial betreffende) Aspekte.
- Lernpsychologische (Charakterisierung der Selbsterklärungen betreffende) Aspekte

7.3.2.4 Auswertungsmethoden

Bestimmung der für Veränderungsmessungen geeigneten Items

Für die Items des Prä- und des Posttests wurden deskriptive Kennwerte, für die Veränderungssensitivität t-Tests für abhängige Stichproben berechnet.

Statistische Prüfung der Hypothesen

Zur statistischen Prüfung der Hypothesen wurden Varianzanalysen für Designs mit Messwiederholung verwendet.

7.3.3 Statistische Hypothesen

Im Folgenden werden für die Ziele 2 und 3 der Untersuchungen die statistischen Hypothesen festgelegt (Ziel 1, die Untersuchung eines Itempools wird getrennt untersucht. Alle Hypothesen beziehen sich auf den Itempool, der sich als geeignet erweist).

Die für die Hypothesen verwendeten Gruppenbezeichnungen bedeuten Folgendes:

Gruppe 1: mit Selbsterklärungen/mit Unterbrechungen

Gruppe 2: mit Selbsterklärungen/ ohne Unterbrechungen

Gruppe 3: ohne Selbsterklärungen/ mit Unterbrechungen

Gruppe 4: ohne Selbsterklärungen/ ohne Unterbrechungen

Statistische Hypothese 1: Der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärung größer als in der Gruppe ohne Selbsterklärung:

H1: $\mu_1, \mu_2 \geq \mu_3, \mu_4$

Alternativhypothese:

H0: $\mu_1, \mu_2 \leq \mu_3, \mu_4$

Statistische Hypothese 2: Der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Unterbrechungen der Simulation größer als in der Gruppe ohne Lernunterbrechungen.

H1: $\mu_1, \mu_3 \geq \mu_2, \mu_4$

Alternativhypothese:

H0: $\mu_1, \mu_3 \leq \mu_2, \mu_4$

Statistische Hypothese 3: Der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärungen und Unterbrechungen am größten, in der Gruppe ohne Selbsterklärungen und ohne Unterbrechungen am geringsten.

H1: $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3 > \mu_4$

Alternativhypothese:

H0: $\mu_1 \leq \mu_2 \leq \mu_3 \leq \mu_4$

Statistische Hypothese 4: Die Leistungen aller Versuchspersonen sind im Posttest besser als im Prätest.

H1: $\mu_{post} > \mu_{pr}$

Alternativhypothese:

H0: $\mu_{post} \leq \mu_{pr}$

7.3.4 Ergebnisse

7.3.4.1 Vorbemerkung

Während der ganzen Untersuchung zeigte sich, dass die Versuchspersonen mit der Bedienung des Programms keine Probleme hatten. Die Versuchspersonen zeigten sich insgesamt motiviert und neugierig. Einige zeigten jedoch beim lauten Äußern der Selbsterklärungen Zurückhaltung, eventuell, weil die Untersuchung aufgrund der Raumverhältnisse immer in Gruppen von 6 Versuchspersonen in einem Raum durchgeführt wurde.

Prüfung der Änderungssensitivität der benutzten Items

Prüfung der Änderungssensitivität der benutzten Fragebogenitems

Für die allgemeinen Aussagen ergab sich für kein Item eine signifikante Verschlechterung. 12 Items zeigten signifikante Verbesserungen, die restlichen 18 zeigten entweder keine Verbesserungen oder leichte Verbesserungen, die aber nicht signifikant waren.

In Tabelle 7.3 werden für die 12 Items mit signifikanten Verbesserungen die Prätestmittelwerte, Posttestmittelwerte, die Ergebnisse der T-Werte (31 Freiheitsgrade) der t-Tests zwischen Prä- und Postwert für abhängige Stichproben sowie die entsprechenden Signifikanzniveaus angegeben:

Allgemeine Fragen

In Tabelle 7.4 werden für die Items zur Aufgabe mit den Magdeburger Kugeln beziehungsweise den Saugnapf wiederum Prätestmittelwerte, Posttestmittelwerte, t-Werte der t-Tests für den Unterschied zwischen Prätest und Posttest (abhängige Stichproben) sowie die entsprechenden Signifikanzniveaus angegeben.

Fragen zu den Aufgaben Magdeburger Kugeln/Saugnapf

Die Ergebnisse zu den Fragebogenitems der Magdeburger Kugel zeigen, dass die ersten 5 Items eine statistisch signifikante Verbesserung vom Prä- zum Posttest anzeigen, lediglich das letzte Item zeigt eine allerdings deutliche Verschlechterung an.

In Tabelle 7.5 werden analog zur obigen Tabelle wieder die statistischen Veränderungskennwerte für die Volleyball- beziehungsweise Fahrrad-Aufgaben aufgelistet:

Fragen zu den Aufgaben Volleyball/Fahrrad

Die Ergebnisse zu den Fragebogenitems der Magdeburger Kugeln zeigen, dass alle Items eine statistisch signifikante Verbesserung vom Prä- zum Posttest anzeigen.

Fragen zu den Aufgaben Farbstoffe/Dialyse

In Tabelle 7.6 werden die statistischen Kennwerte für die Farbstoff- beziehungsweise Dialyseaufgabe aufgeführt (die Aussagenformulierung wird nur für die Farbstoffaufgabe aufgeführt, gilt aber mir geringen Anpassungen auch für die Dialyseaufgabe):

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Item	Mittelwert im Prätest	Mittelwert im Posttest	T(31)	Signifikanzniveau
Die kleinsten Teilchen eines Gases behalten ihre Größe bei	2,16	2,75	-3,840	P<0.05
Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases auf einen Gegenstand treffen, üben sie Druck auf den Gegenstand aus.	1,72	2,72	-5,249	P<0.05
Die kleinsten Teilchen eines Gases können sich auflösen.	2,19	2,66	-3,304	P<0.05
Die kleinsten Teilchen eines Gases bewegen sich unabhängig voneinander.	1,88	2,28	-2,030	P<0.05
Die kleinsten Teilchen eines Gases spalten sich manchmal in ihre Bruchteile auf.	1,50	1,81	-1,899	P<0.05
Zwei kleinste Teilchen eines Gases verformen sich beim Zusammenprall elastisch wie Gummibälle.	1,94	2,34	-1,892	P<0.05
Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases zusammenprallen, verändern sich dadurch ihre Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit.	2,13	2,50	-2,339	P<0.05
Die kleinsten Teilchen der Luft in einem Behälter sind bewegungslos.	2,31	2,81	-2,701	P<0.05
Die kleinsten Teilchen eines Gases passen überall hindurch.	1,53	2,16	-2,361	P<0.05
Je schneller ein kleinstes Teilchen eines Gases ist, desto mehr Druck übt es beim Zusammenprall mit etwas anderem aus.	2,34	2,78	-2,239	P<0.05
Die kleinsten Teilchen eines Gases bleiben auf der Stelle stehen.	2,66	2,97	-2,396	P<0.05
Wenn die kleinsten Teilchen eines Gases gegen einen Gegenstand stoßen, verändern sie ihre Bewegungsrichtung.	2,44	2,72	-2,329	P<0.05

Tabelle 7.3: t-Tests für abhängige Stichproben zur Bestimmung der Änderungssensitivität der allgemeinen Items in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Item	Mittelwert im Prätest	Mittelwert im Posttest	T(31)	Signifikanzniveau
Ein Vakuum innerhalb einer Kugel (innerhalb eines Saugnapfs) hält die beiden Hälften zusammen.	0,32	1,48	-4,168	P<0.05
Wenn die kleinsten Teilchen der Luft von außen gegen die Kugel (den Saugnapf) prallen, werden die beiden Halbkugeln zusammengedrückt (wird der Saugnapf gegen die Wand gedrückt)	1,06	1,97	-3,794	P<0.05
Die Halbkugeln werden zusammengedrückt, weil nach dem Entfernen der Luft weniger kleinste Teilchen in der Kugel sind.	1,81	2,19	-1,836	P<0.05
Die kleinsten Teilchen der Luft innerhalb der Kugel (des Saugnapfs) stoßen die beiden Halbkugeln auseinander (den Saugnapf von der Wand weg), wenn sie von innen gegen sie (ihn) prallen.	0,87	2,77	-8,316	P<0.05
Die Kugel wird zusammengedrückt (der Saugnapf wird gegen die Wand gedrückt), weil nach dem Entfernen der Luft mehr Teilchen von außen als von innen gegen die Kugel (den Saugnapf) prallen.	1,65	2,06	-1,895	P<0.05
Wenn Luft aus der Kugel heraus gesogen wird (aus dem Saugnapf herausgedrückt wird), dann schrumpfen die kleinsten Teilchen der Luft im Inneren zusammen.	2,48	1,10	6,147	P<0.05

Tabelle 7.4: t-Tests für abhängige Stichproben zur Bestimmung der Items zu den Druckdifferenzaufgabe in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Item	Mittelwert im Prätest	Mittelwert im Posttest	T(31)	Signifikanzniveau
Wenn die Luft abgekühlt wird, stoßen die kleinsten Teilchen der Luft nicht so stark gegen die Wände des Balls (Reifens), weil sich die Teilchen schwächer gegenseitig voneinander abstoßen.	1,78	2,53	-3,341	P<0.05
Wenn die Luft im Ball (Reifen) erwärmt wird, dann kollidieren die kleinsten Teilchen der Luft heftiger miteinander, weil ihre Geschwindigkeit größer wird.	2,31	2,81	-3,088	P<0.05
Wenn die Luft abgekühlt wird, werden die kleinsten Teilchen der Luft langsamer.	2,09	2,45	-3,824	P<0.05
Die kleinsten Teilchen der Luft werden schneller, wenn die Luft erwärmt wird.	2,38	2,97	-3,552	P<0.05
Wenn die Luft im Ball abkühlt, dann kollidieren die kleinsten Teilchen der Luft schwächer miteinander, weil ihre Geschwindigkeit kleiner wird.	2,28	2,72	-1,951	P<0.05
Wenn die Luft erwärmt wird, werden die kleinsten Teilchen langsamer.	2,28	2,71	-1,913	P<0.05
Wenn die Luft abgekühlt wird, dann bleibt die Geschwindigkeit der kleinsten Teilchen gleich.	2,25	2,63	-1,751	P<0.05
Die Luft in einem Behälter drückt von innen gegen die Behälterwände.	2,00	2,28	-1,722	P<0.05
Heiße Luft übt einen stärkeren Druck auf einen Behälter aus als kalte Luft.	2,56	2,88	-2,396	P<0.05

Tabelle 7.5: t-Tests für abhängige Stichproben zur Bestimmung der Änderungssensitivität der Items zur thermischen Luftexpansion in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Item	Mittelwert im Prätest	Mittelwert im Posttest	T(31)	Signifikanzniveau
Die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs sind zu groß, um durch die Schlauchwand nach außen zu gelangen.	2,22	2,41	-1,791	P<0.05
Die kleinsten Teilchen des violetten Farbstoffs können sich durch die Poren zwingen, indem sie ihre Form verändern.	1,38	1,88	-2,555	P<0.05
Die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs sind zu hart, um an der der Schlauchwand zu zerbrechen.	2,00	1,56	2,182	P<0.05
Die kleinsten Teilchen des violetten Farbstoffs sind kleiner als die gelben Farbstoffs und gelangen deshalb nach aussen.	2,63	2,25	1,918	P<0.05
Die violette Farbstoff wird vom Wasser außen angesaugt.	1,53	1,22	2,918	P<0.05
Der Druck der Wassers außerhalb des Schlauchs drückt die kleinsten Teilchen des gelben Farbstoffs in den Schlauch zurück.	1,94	1,50	2,441	P<0.05

Tabelle 7.6: t-Tests für abhängige Stichproben zur Bestimmung der Änderungssensitivität der Items Diffusion in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Die Ergebnisse zu den Fragebogenitems der Farbstoff- bzw. Dialyseaufgabe zeigen, dass die Items 1 und 2 eine Verbesserung vom Prä- zum Posttest anzeigen, während die Items 3,4,6 und 6 im Posttest schlechter beantwortet werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei der Kombination dieser Testitems mit der Lernaufgabe und den Testaufgaben wahrscheinlich ein Faktor wirkt, der insgesamt zu einer Verschlechterung der Testleistungen führt.

Weil die Lernaufgabe auf der submikroskopischen Ebene einfach ist (teilchengrößenabhängiges Durchdringen eines Hindernisses), liegt das Problem hier eher bei den Testaufgaben: Es fällt auf, dass die Posttestaufgaben schon vom Versuchsaufbau erheblich komplexer ausfallen als die Prätestaufgabe. Diese zu hohe Schwierigkeit der Posttestaufgabe ist wahrscheinlich der Grund für die Verschlechterung der Testleistungen der Versuchspersonen.

Insgesamt bestätigen die Auswertungen der Änderungssensitivität, dass die Kombination aus Aufgaben und Items zur Luftexpansion für Prä-Post-Untersuchungen genügend änderungssensitiv ist, während dies nicht für die Dialyseaufgaben zutrifft. Hierfür ist wahrscheinlich die zu große Schwierigkeit der Posttestaufgabe, also der Aufgabe zur Nierendialyse, verantwortlich.

Prüfung der Änderungssensitivität der benutzten grafischen Beurteilungssitems zu den Aufgaben Magdeburger Kugel/ Saugnapf

Wie Tabelle der t-Tests 7.7 zwischen abhängigen Stichproben zeigt, wurde nur in einem von 8 der grafischen Beurteilungssitems eine signifikante Veränderung gefunden. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass diese Items (und eventuell sogar diese Itemform) ungeeignet sind, Veränderungen durch einen Lernprozess zu messen. Sie werden deshalb nicht weiter betrachtet.

Mittelwert Prätests	Mittelwert des Posttests	Mittelwert der Differenz Prätest-Posttest	Standardabweichung	t-Wert	Freiheitsgrade df	Sig. (2-seitig)
Item 1	1,84	2,35	,51	-2,188	30	,037
Item 2	1,23	1,52	,29	-1,510	30	,142
Item 3	2,06	1,90	,16	,818	30	,420
Item 4	1,48	1,71	,23	-1,366	30	,182
Item 5	1,65	1,61	,04	,144	30	,887
Item 6	1,48	1,74	,26	-1,114	30	,274
Item 7	2,19	2,16	,03	,183	30	,856
Item 8	1,45	1,55	,1	-,619	30	,540

Tabelle 7.7: t-Tests für den Prätest-Posttest-Unterschied der grafischen Beurteilungssitems (Aufgaben zur Magdeburger Kugel/ zum Saugnapf) (aus Brunner, 2000)

Prüfung der Änderungssensitivität der Concept-Maps (Volleyballaufgabe/Fahrradreifenaufgabe)

Zur Prüfung der Änderungssensitivität der Concept Maps Volleyballaufgabe/Fahrradreifenaufgabe wurde ein Verfahren nach Eckert (1998) verwandt. Zunächst wurden für die Concept Maps des Prätests und des Posttests zwei verschiedene Korrespondenzkoeffizienten bestimmt (die Einzelheiten zu dieser Korrespondenzanalyse finden sich in Eckert, 1998). C_1 ist ein Koeffizient, der die

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Begriffsrelationen ohne ihre Richtung und ihre Benennung einbezieht, C_2 berücksichtigt zwar die Benennung, nicht aber die Richtung der Relationen. Für beide Koeffizienten wurde jeweils ein gewichteter und ein ungewichteter Wert berechnet. Dabei berücksichtigt der gewichtete Wert, ob in der Darstellung der Expertin nur wenige von insgesamt vielen möglichen Kanten gebraucht wurden (dann wird diesen wenigen Kanten im Netz der jeweiligen Versuchsperson ein höheres Gewicht beigemessen), bzw. nur wenige von vielen möglichen weggelassen wurden (dann würden die weggelassenen Kanten im Netz der Versuchsperson besonders stark gewichtet).

Wie die folgenden beiden Tabellen 7.8 und 7.9 zeigen, ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Korrespondenzkoeffizienten, also eine deutliche Änderungssensitivität nur für den unspezifischen Koeffizienten C_1 . Da gerade beim Erlernen des Teilchenmodells aber Relationsnamen (z.B. im Falle der Modellrelationen) wichtig sind, erscheinen Concept-Maps als Messinstrumente des Lernerfolgs eher ungeeignet. Dass der Lernerfolg mit den differenzierter erfassenden Koeffizienten nicht erfasst werden kann, könnte mit der zu großen Schwierigkeit der genauen Kantenbestimmung (Richtung und Beschriftung) durch die Versuchspersonen erklärt werden. Das Concept Mapping Verfahren scheint damit für diese Versuchspersonenpopulation bei dieser Untersuchung ein zu schwieriges Untersuchungsinstrument zu sein und wird hier nicht weiter untersucht.

	C_1	C_2
Einfacher Koeffizient	0,8383	0,8235
Gewichteter Koeffizient	0,6746	0,3560

Tabelle 7.8: Korrespondenzkoeffizienten für die Concept Map der Fußball-Aufgabe. Zusammenhang zwischen dem Expertennetz und dem Modalnetz der Versuchspersonen (berechnet wurde C_1 für die ungerichteten, unbenannten Begriffsrelationen und C_2 für die gerichteten, unbenannten Begriffsrelationen).

	C_1	C_2
Einfacher Koeffizient	0,8676	0,8088
Gewichteter Koeffizient	0,9939	-0,2806

Tabelle 7.9: Korrespondenzkoeffizienten für die Concept Map der Reifenaufgabe. Zusammenhang zwischen dem Expertennetz und dem Modalnetz der Versuchspersonen (berechnet wurde C_1 für die ungerichteten, unbenannten Begriffsrelationen und C_2 für die gerichteten, unbenannten Begriffsrelationen).

Prüfung der Änderungssensitivität der Gruppierungsaufgaben (Farbstoffdiffusion / Dialyseaufgabe)

Wie oben beschrieben, traten bei der Durchführung der Gruppierungsaufgaben zur Farbstoffdiffusion und Dialyse technische Probleme auf, weshalb diese Testform zur Farbstoffdiffusions- und Dialyseaufgabe nicht weiter betrachtet wird.

Prüfung der Hypothesen

Überprüfung der Hypothesen für die allgemeinen Fragen

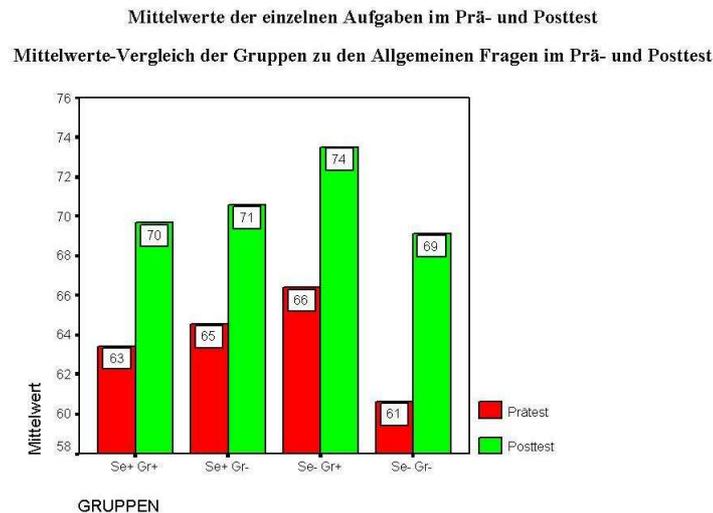


Abbildung 7.14: Vergleich der Mittelwerte der allgemeinen Fragen für die 4 verschiedenen Untersuchungsgruppen (aus Brunner, 2000)

Betrachtung der Gruppenmittelwerte für den Prätest:

Die Unterschiede zwischen den Gruppen gering. Die Gruppe *ohne Selbsterklärungen/mit Unterbrechungen* zeigt die besten Leistungen. Mit den ähnlichen Werten im Prätest ist eine wichtige Voraussetzung dafür gegeben, Veränderungen zwischen Prä- und Posttestwerten auf Lerneffekte zurückführen zu können.

Varianzanalytische Überprüfung der Innersubjekteffekte (mit Greenhouse-Geiser-Korrektur) anhand der Fragebogendaten

Tabelle 7.10 zeigt die F-Werte des Messwiederholungsfaktors (MWH) und der statistischen Interaktion zwischen Messwiederholungsfaktor und Selbsterklärungsfaktor (SE) sowie Granularitätsfaktor (GR).

Die Ergebnisse der “Allgemeinen Fragen” ist zu entnehmen, dass ein statistisch sehr signifikantes Ergebnis für den Wiederholungsfaktor vorliegt. Damit kann die Hypothese 4 (die Leistungen aller Versuchspersonen sind im Posttest besser als im Prätest) als bestätigt gelten. Die Interaktionen des Messwiederholungsfaktors mit den Faktoren Selbsterklärung und Granularität fallen nicht signifikant aus. Für die über alle Fragenitems aller Testaufgaben gemittelte Auswertung lässt sich also feststellen, dass weder für den Faktor Selbsterklärungen noch für den Faktor Granularität ein statistisch nachweisbarer Effekt vorliegt. Damit sind für die Beurteilung der allgemeinen Aussagen die Hypothesen 1 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärung größer als in der Gruppe ohne Selbsterklärung), 2 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Unterbrechungen der Simulation größer als in der Gruppe ohne Lernunterbrechungen) und 3 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärungen und Unterbrechungen am größten, in der Gruppe ohne Selbsterklärungen und ohne Unterbrechungen am geringsten) widerlegt.

Überprüfung der Hypothesen für die spezifischen Fragen zu den Aufgaben Magdeburger Kugeln / Saugnapf

Betrachtung der Gruppenmittelwerte für den Prätest

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Quelle der Varianz	F (1,28)	Signifikanz
MWH (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	25,7	0,00***
Interaktion: MWH*SE (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,384	,541
Interaktion: MWH*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,044	,835
Interaktion: MWH*SE*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,085	,773

Tabelle 7.10: Ergebnisse der Varianzanalyse der allgemeinen Fragen in Studie (aus Brunner, 2000)

Mittelwerte-Vergleich der Gruppen zu den Magdeburger Kugeln-Fragen (Prätest) und den Saugnapf-Fragen (Posttest)

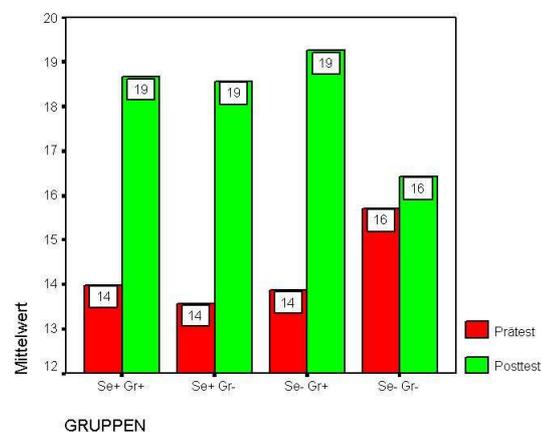


Abbildung 7.15: Vergleich der Gruppenmittelwerte für die Aussagenbeurteilungen zur Druckdifferenz (aus Brunner, 2000)

Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Gruppen gering. Die Gruppe *ohne Selbsterklärungen/mit Unterbrechungen* zeigt die besten Leistungen, gefolgt von den Gruppen Se+/Gr+, Se-/Gr+ und Se+/Gr-. Mit diesen geringen Unterschieden ist eine wichtige Voraussetzung dafür gegeben, Veränderungen zwischen Prä- und Posttest auf Lerneffekte zurückführen zu können.

Test der Innersubjekteffekte

Quelle der Varianz	F (1,27)	Signifikanz
MWH (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	21,51	0,00***
Interaktion: MWH*SE (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	1,090	,306
Interaktion: MWH*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	1,595	,217
Interaktion: MWH*SE*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	2,125	,156

Tabelle 7.11: Ergebnisse der Varianzanalyse der Fragen zu den Druckdifferenzaufgaben in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Tabelle 7.11 zeigt einen signifikanten Messwiederholungsfaktor. Der Wert der Interaktion Messwiederholung*Selbsterklärung*Granularität weist zwar eindeutiger auf einen Effekt hin als die übrigen Werte, ist aber dennoch weit von einem signifikanten Ergebnis entfernt. Die Hypothese 4 (die Leistungen aller Versuchspersonen sind im Posttest besser als im Prätest) kann damit für die Beurteilungssitems der Aufgaben zur Druckdifferenz (Magdeburger Kugel/Saugnapf) als bestätigt gelten. Die Hypothesen 1 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärung größer als in der Gruppe ohne Selbsterklärung), 2 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Unterbrechungen der Simulation größer als in der Gruppe ohne Lernunterbrechungen) und 3 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärungen und Unterbrechungen am größten, in der Gruppe ohne Selbsterklärungen und ohne Unterbrechungen am geringsten) sind nicht bestätigt worden.

Wahrscheinlichkeitsbeurteilung grafisch dargestellter Teilchenmodellskizzen für die Aufgabe Magdeburger Kugel/-Saugnapf

Test der Innersubjekteffekte

Auch bei den Wahrscheinlichkeitseinschätzungen ist lediglich ein sehr signifikanter Wiederholungseffekt zu finden (Tabelle 7.12). Die Hypothese 4 (die Leistungen aller Versuchspersonen sind im Posttest besser als im Prätest) kann auch hier als bestätigt gelten. Die Hypothesen 1 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärung größer als in der Gruppe ohne Selbsterklärung), 2 2 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Unterbrechungen der Simulation größer als in der Gruppe ohne Lernunterbrechungen) und 3 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärungen und Unterbrechungen am größten, in der Gruppe ohne Selbsterklärungen und ohne Unterbrechungen am geringsten) sind nicht bestätigt worden.

Überprüfung der Hypothesen für die spezifischen Fragen der Aufgaben zur thermischen Luftexpansion (Volleyball /Fahrradreifen)

Test der Innersubjekteffekte

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Quelle der Varianz	F (1,27)	Signifikanz
MWH (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	27,925	0,00***
Interaktion: MWH*SE (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,827	,371
Interaktion: MWH*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,218	,644

Tabelle 7.12: Ergebnisse der Varianzanalyse der grafischen Modellaufgaben zu den Druckdifferenzaufgaben in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Mittelwerte-Vergleich der Gruppen zu den Volleyball-Fragen (Prätest) und den Fahrrad-Fragen (Posttest)

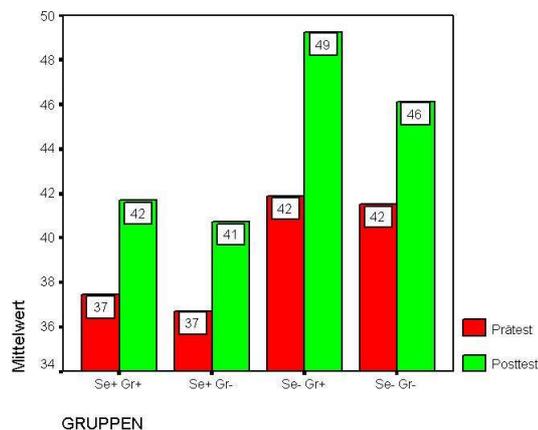


Abbildung 7.16: Vergleich der Gruppenmittelwerte für die Aussagenbeurteilungen zur thermischen Luftexpansion (aus Brunner, 2000)

Bei diesen Aufgaben zeigt sich ebenfalls ein sehr signifikanter Messwiederholungsfaktor (Tabelle 7.13). Die Faktoren Selbsterklärung und Granularität weisen keinerlei Signifikanzen auf. Die Hypothese 4 (die Leistungen aller Versuchspersonen sind im Posttest besser als im Prätest) kann auch hier als bestätigt gelten. Die Hypothesen 1 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärung größer als in der Gruppe ohne Selbsterklärung), 2 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Unterbrechungen der Simulation größer als in der Gruppe ohne Lernunterbrechungen) und 3 (der Lerneffekt ist in der Gruppe mit Selbsterklärungen und Unterbrechungen am größten, in der Gruppe ohne Selbsterklärungen und ohne Unterbrechungen am geringsten) sind nicht bestätigt worden.

Prätest

Wiederum zeigen sich zwischen den einzelnen Gruppen nur geringe Unterschiede.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Quelle der Varianz	F (1,28)	Signifikanz
MWH (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	13,108	0,00**
Interaktion: MWH*SE (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,457	,504
Interaktion: MWH*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,238	,599
Interaktion: MWH*SE*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,205	,654

Tabelle 7.13: Ergebnisse der Varianzanalyse der Fragen zu den Aufgaben zur thermischen Luftexpansion in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Überprüfung der Hypothesen für die spezifischen Fragen der Aufgaben zur Diffusion (Farbstoffe/Dialyse-Aufgabe)

Die Ergebnisse zur den Diffusionsaufgaben werden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, denn aufgrund der mangelnden Änderungssensitivität der Aussagebeurteilungen (die wahrscheinlich auf die zu schwere Posttestaufgabe zur Dialyse hinweist) und der technischen Probleme bei der Gruppierungsaufgabe können die Aufgaben zur Diffusion keine Hinweise zur empirischen Gültigkeit der Hypothesen ge

Statistischer Test der Innersubjekteffekte

Ergebnisse der Varianzanalyse der Fragen zu den Aufgaben zur thermischen Luftexpansion in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Quelle der Varianz	F (1,28)	Signifikanz
MWH (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	4,098	,053
Interaktion: MWE*SE (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,1281	,267
Interaktion: MWE*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	4,067	,053
Interaktion: MWE*SE*GR (korrigiert nach Greenhouse-Geiser)	,27	,872

Tabelle 7.14: Ergebnisse der Varianzanalyse der Fragen zu den Aufgaben zur Diffusion in Studie 2 (aus Brunner, 2000)

Mittelwerte-Vergleich der Gruppen zu den Farbstoff-Fragen (Prätest) und den Dialyse-Fragen (Posttest)

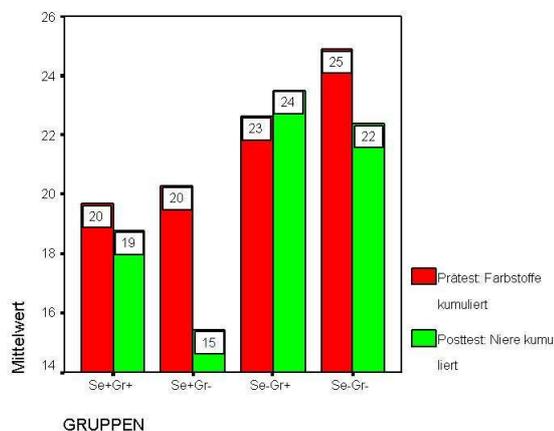


Abbildung 7.17: Vergleich der Gruppenmittelwerte für die Farbstoff- und Dialyse-Aufgabe (aus Brunner, 2000)

Als einziges Aufgabenpaar weisen Farbstoff- und Dialyseaufgabe keinen signifikanten Messwiederholungsfaktor auf (Tabelle 7.14).

Wie Abbildung 7.17 zeigt, verschlechterten sich die Leistungen der Gruppen Se+Gr+, Se+Gr- und Se-Gr- vom Prätest zum Posttest. Nur die Gruppe *ohne Selbsterklärung/ohne Unterbrechung* konnte geringfügige Verbesserungen aufweisen. Auffallend ist die beträchtliche Verschlechterung der Gruppe *mit Selbsterklärung/mit Unterbrechungen* um einen Durchschnittswert von fast 5 Punkten vom Prätest zum Posttest.

Da das Aufgabenpaar aufgrund der wahrscheinlich zu schweren Posttestaufgabe nicht für die Veränderungsmessung geeignet ist, ist dieses Ergebnis zur Farbstoffdiffusions- bzw. Dialyseaufgabe erwartungsgemäß.

7.3.5 Zusammenfassung und Diskussion

Das erste Ziel dieser Untersuchung war es, änderungssensitive Aufgabenkombinationen (oberflächlich unterschiedlich, aber in der Erklärungsstruktur analog) für den Prä- und Posttest sowie entsprechende Items, bzw. Itemformen zu identifizieren. Um diese Ziele erreichen zu können, muss man den aus der Literatur bekannten Lerneffekt beim Teilchenmodellerwerb mit Animationen (z.B. Hollstein, 2001) voraussetzen. Die empirischen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Experimentkombination aus den Aufgaben zur Luftdruckdifferenz (Magdeburger Kugel/Saugnapf) und zur thermischen Luftexpansion (Volleyball/Fahrradreifen) genügend änderungssensitiv sind, während dies für die Kombination zur Diffusion (Farbstoffdiffusion/Nierendialyse) nicht gilt. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass die Aufgabe zur Nierendialyse als Posttest zu schwierig ist.

Ein großer Teil der Beurteilungssitems (sowohl im allgemeinen Teil als auch in den aufgabenspezifischen Bereichen) kann als genügend änderungssensitiv gelten. Wahrscheinlich beinhalten die Beurteilungen mittels grafischer Darstellungen für diesen Inhaltsbereich zu große Schwierigkeiten, während bei den Concept Maps nicht klar ist, ob der unklare Lerneffekt (keine Effekte bei Auswertung von Kantenrichtung und -beschriftung, Effekt bei unspezifischeren Auswertungen) auf die oben beschriebenen Probleme der Aufgabenkombination Farbstoffdiffusion/Nierendialyse oder auf das Instrument des Concept Map zurückgeht (d.h. ein Methodenartefakt darstellt).

Dieses Ergebnis spricht zusammengefasst dafür, für weitere Untersuchungen möglichst einfache

Itemformen zu verwenden, weil den Versuchspersonen und Schüler neben der kognitiven Belastung durch die Aufgabenbeantwortung nur möglichst geringe Belastungen durch die Testmethoden auferlegt werden sollten.

Zum Zweiten wollte diese Untersuchung den Einfluss von Selbsterklärungen und Größe der Informationseinheiten auf das Lernen naturwissenschaftlicher Stoffmodelle mit Animationen untersuchen. Die vor Beginn der Untersuchung aufgestellten Hypothesen konnten zum größten Teil nicht angenommen werden. Zwar zeigte sich eindeutig bei allen Versuchspersonen ein genereller Lerneffekt vom Prätest hin zum Posttest, doch systematische Beeinflussungen der Versuchspersonen in den verschiedenen Versuchsbedingungen durch die experimentell induzierten Faktoren der Selbsterklärung und der zeitlichen Stückelung der Animationen konnten nicht gefunden werden. Prinzipiell ist danach Lernen des Teilchenmodells mit Animationen / Simulationen bei Anfängern geeignet, doch konnte das Lernen mit Selbsterklärung und zeitlicher Stückelung der Animationen in dieser Untersuchung keine signifikant besseren Leistungen induzieren.

Dies mag zum Teil daran liegen, dass die an dieser Untersuchung teilnehmenden Versuchspersonen schon knapp ein Jahr Chemieunterricht hatten und somit nicht die geeignete Zielgruppe für das Lernprogramm darstellten. Bei jüngeren Versuchspersonen aus der Klassenstufe 8, die kein oder fast kein Vorwissen mitbringen, hätten Selbsterklärungen vielleicht einen größeren Effekt, da hier ein radikaler Konzeptwechsel stattfinden würde. Plausibel ist auch die Vermutung (z.B. Renkl, Gruber, Weber, Lerche & Schweizer, 2003), dass die kognitive Belastung beim Erzeugen von verbalen Selbsterklärungen gerade aus den schon hoch belastenden Animationen so groß ist, dass das Produzieren von Selbsterklärungen beim Teilchenwerb aus Animation kontraproduktiv ist. Die zeitliche Stückelung von Animationen bringt vielleicht deshalb keinen Effekt, weil die in den Animationen enthaltene Information aus ungestückelten Animationssequenzen genauso gut extrahiert werden kann. Späteren Untersuchungen vorbehalten bleibt der Effekt der Vereinfachung der Simulationskomponenten. Beispielsweise kann untersucht werden, ob eine bezüglich der Teilchenzahl auf das Notwendige beschränkte Simulation wegen ihrer Komplexitätsreduktion lernwirksamer ist als Simulationen mit hohen Teilchenzahlen.

7.4 Eine Untersuchung zum Einfluss von Alltagsanalogien auf das initiale mentale Teilchenmodell und zu den Modifikationen des initialen Modells durch die Konstruktion eigener Teilchenmodelle in einer computerbasierten Umgebung

Diese Untersuchung benutzt die Ergebnisse der vorhergehenden Studie und wendet sich dem zentralen Thema dieser Arbeit zu, der Untersuchung des Teilchenmodellerwerbs mit Mechanismen der Analogiebildung. Sie benutzt die lernsensitiven Untersuchungssitens und überprüft zunächst einmal die Lernwirksamkeit der Modellierungsumgebung. Im Fokus der Untersuchung steht aber die Frage, wie das Lernen mit Analogien den Erwerb des Teilchenmodells erklären kann. In diesem Kapitel werden die Untersuchung und ihre Ergebnisse dargestellt, die Interpretation der Ergebnisse mit Mitteln der kognitiven Simulation folgt im nächsten Kapitel.

7.4.1 Ziel der Untersuchung

Um den Einfluss von Analogien auf den Erwerb des Teilchenmodells zu untersuchen, wurden 2 verschiedene Arten von Analogien von den Versuchspersonen studiert: Am Anfang der Untersuchung wurden von 2 Versuchspersonengruppen zwei unterschiedliche Geschichten studiert. Später versuchte jede Versuchsperson in einer Lernphase, mittels des Konstruktionsprogramms Teilchenmodellsimulationen zu zwei verschiedenen Phänomenen zu konstruieren. Um den Einfluss dieser beiden Analogien auf den Erwerb des Teilchenmodells untersuchen zu können, bearbeiteten die

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Versuchspersonen sowohl nach dem Lesen der Geschichte als auch nach der Arbeit mit dem Konstruktionsprogramm den gleichen Test, der aus der Erklärung zweier Testphänomene bestand, die sich nur in ihrer Oberflächenstruktur (nicht aber in den erklärenden Teilchenmodellmechanismen) von den Phänomenen der Lernphase unterschieden. Zentral sollten so folgende Einflüsse der beiden Analogien auf die Testaufgaben des Prä-/Posttests untersucht werden:

- Inwieweit die beiden Geschichten durch ihre Unterschiede zu unterschiedlichen Erklärungen der Phänomene des Prätests führen.
- Inwieweit die in der Lernphase erreichten erklärenden Teilchenmodellkonstruktionen danach zu anderen Lösungen der Testaufgaben des Prä-/Posttests führen.

7.4.2 Methode

7.4.2.1 Versuchspersonen

Die Untersuchung wurde an einer Realschule in Baden-Württemberg mit 16 Schülerinnen und Schülern der 9. Klasse durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler waren zwischen 13 und 15 Jahren alt und besuchten im ersten Jahr den Chemieunterricht. Kurze Zeit nach der Untersuchung sollte im Unterricht die Einheit über das Teilchenmodell beginnen.

7.4.2.2 Untersuchungsdesign

Die Untersuchung wurde mit dem Design der Tabelle 7.15 durchgeführt.

Untersuchungsphase 1: Induktion einer Analogie zum Teilchenmodell Die Versuchspersonen beider Gruppen lasen in der ersten Untersuchungsphase je eine Geschichte, die eine Analogie des Teilchenmodells induzieren sollte. Die Quellanalogien wurden so ausgewählt, dass sie charakteristische Unterschiede enthielten, die bei der analogen Übertragung auf das mentale Teilchenmodell zu unterschiedlichen mentalen Teilchenvorstellungen führen sollten. Zunächst werden die beiden Geschichten aufgeführt und die Unterschiede beschrieben, die zu charakteristischen Unterschieden beim per Analogie gebildeten Teilchenmodell führen sollten.

Geschichte der ersten Untersuchungsgruppe

“In einer Sportstunde fängt gerade eine Klasse ein Ballspiel mit großen und kleinen Bällen an. Die Klasse hat sich in 2 Gruppen geteilt, die jeweils in einer Hälfte der kleinen Sporthalle aufgestellt sind. Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bällen. In der Mitte der Sporthalle ist ein großes Netz gespannt, das von einer Wand zur anderen reicht und nach oben bis zur Hallendecke. Es hat einige größere und viele kleinere Maschen. Die größeren Maschen sind gerade so groß wie die größten Bälle, durch die kleinsten Löcher passt nicht einmal der kleinste Ball. Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Bälle wie möglich durch das Netz in die Spielhälfte der anderen Gruppe zu werfen. Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an. Alle werfen Bälle zum Netz. Andauernd treffen sich einige Bälle und fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum. Manche kleineren Bälle fliegen durch das Netz, weil sie durch die Maschen passen. Einige der größeren Bälle sind aber so groß, dass sie nirgendwo hindurchpassen. Sie fliegen fast immer in das Netz und werden wieder zurückgeschleudert. Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel. Alle zusammen zählen aus, welche Gruppe die meisten Bälle in die Hälfte der anderen befördert hat.”

Diese erste Geschichte soll eine Analogie zwischen Teilchen und Bällen induzieren. Folgende Eigenschaften sind charakteristisch:

- Teilchen werden in dieser Analogie als feste Kugeln unterschiedlicher Größe gesehen, die miteinander und mit anderen Gegenständen in mehr oder weniger elastischem Stoß kollidieren.
- Die kleinen Teilchen können durch Netze mit genügend großen Öffnungen hindurch treten, die größeren Teilchen werden durch die Netze zurückgehalten.
- In dieser Analogie wird die Bewegung der Teilchen durch aktive Agenten verursacht.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Untersuchungsphase	Gruppe 1	Gruppe 2
Untersuchungsphase 1 (gruppenspezifische Analogieinduktion)	Geschichte über ein Ballspiel im Sportunterricht	Geschichte über einen Fischfang
Untersuchungsphase 2 (für beide Gruppen gleiche Vortestphase)	2 Testaufgaben: 1. Diffusion von Farbstoffen 2. Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser	2 Testaufgaben: 1. Diffusion von Farbstoffen 2. Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser
Untersuchungsphase 3 (für beide Gruppen gleiche Lernphase)	2 Lernaufgaben in der computergestützten Konstruktionsumgebung: 1. Diffusion von Wasserstoff und Sauerstoff durch eine Membran 2. Brownsche Bewegung von Rauch in Luft	2 Lernaufgaben in der computergestützten Konstruktionsumgebung: 1. Diffusion von Wasserstoff und Sauerstoff durch eine Membran 2. Brownsche Bewegung von Rauch in Luft
Untersuchungsphase 4 (für beide Gruppen gleiche Nachtestphase)	2 Testaufgaben: 1. Diffusion von Farbstoffen 2. Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser	2 Testaufgaben: 1. Diffusion von Farbstoffen 2. Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser

Tabelle 7.15: Untersuchungsdesign der Studie 3

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Geschichte der zweiten Untersuchungsgruppe

“Ein Boot fährt am frühen Morgen auf einen Binnensee zum Fischen hinaus. Die Fischerin hat es vor allem auf die großen Fische, etwa Karpfen oder Rotaugen, abgesehen. Sie legt ein Netz aus mit Maschen, die kleiner als die Karpfen sind. Wenn die Karpfen in das Netz geraten, können sie deshalb mehr nicht durch die Maschen hindurch ins freie Wasser entkommen und bleiben gefangen. Aber es gibt auch noch kleine Fische im See, Bitterlinge oder Stichlinge zum Beispiel. Diese kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen und entkommen wieder in den See. Die Fischerin zieht das Netz langsam enger. Die Karpfen wollen unbedingt fliehen und versuchen, durch das Netz zu entkommen. Aber die Maschen sind zu eng für die Karpfen. In der Enge prallen sie gegeneinander und ändern dabei immer wieder ihre Schwimmrichtung. Oft stoßen sie auch gegen das Netz, kommen aber nicht hindurch und suchen an einer anderen Stelle ihr Glück. Die kleinen Fische passen durch die Maschen und können also entkommen, während alle Karpfen im Netz gefangen werden. Schließlich zieht die Fischerin das Netz ein und wirft es ins Boot. Sie steuert das Boot wieder an Land. Gegen Mittag bringt die Fischerin ihren Fang zu den Fischhändlern und verkauft die Karpfen.”

Die zweite Geschichte legt eine Analogie zwischen Fischen und Teilchen mit folgenden Charakteristika nahe.

- Wie in der ersten Geschichte unterscheiden sich Teilchen durch ihre Größen.
- Kleine Teilchen können durch entsprechend große Öffnungen eines Hindernisse hindurchtreten, große werden zurückgehalten.
- Fische stoßen in einem engen Netz miteinander zusammen, Ihre Bewegung wird stärker durch ihr aktives Verhalten bestimmt als durch passiv erlittene Kollisionen.
- Die Fische werden nicht durch Agenten in Bewegung gehalten.

Um das Verständnis der Geschichte zu erfassen und auf Versuchspersonenseite die tiefere Verarbeitung zu fördern, wurden die Versuchspersonen danach aufgefordert, den Inhalt ihrer jeweils gelesenen Geschichte auf einem Blatt Papier zu skizzieren und dem Versuchsleiter ihr Bild zu erklären.

Untersuchungsphase 2: Test Im Anschluss an die Untersuchungsphase 1 erhielten die Versuchspersonen 2 Aufgaben. Sie werden zunächst aufgeführt und anschließend näher erklärt.

Die erste Aufgabe wurde wie in der folgenden Abbildung auf dem Computerbildschirm abgebildet. Nachdem die Versuchsperson die Aufgabe gelesen hatte, erklärte sie zunächst dem Versuchsleiter, wie sie den Versuch in einem Schullabor aufbauen würde und welche Beobachtung sie machen würde. Der Versuchsleiter korrigierte Missverständnisse und Lücken beim Versuchsaufbau und den Beobachtungen, um sicher zu stellen, dass der makroskopische Teil der Aufgabe von allen Versuchspersonen korrekt verstanden wurde. Somit blieb den Versuchspersonen die Aufgabe, für ein bekanntes makroskopisches Phänomen eine submikroskopische Erklärung mündlich zu vermitteln.

Der Versuchsleiter legte den Versuchspersonen zunächst nahe, bei Ihren Lösungsversuchen an die Geschichte zu denken, die sie gerade gelesen und gezeichnet hatten. Dann konnten die Versuchspersonen ihre eigenen spontanen Erklärungen äußern. Der Versuchsleiter fragte danach aber noch einmal nach den Eigenschaften der Lösung, die sich auf die Aspekte bezogen, bei denen die analoge Übertragung aus der Geschichte Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ergeben sollte.

Bei der zweiten Aufgabe wurde analog verfahren.

Erste Aufgabe

Den Versuchspersonen wurden bei der ersten Aufgabe eine Animation zur „Diffusion“ von Wasserstoff bzw. Stickstoff durch Ton vorgeführt. Die Gase werden darin unter einen Glasbecher (mit

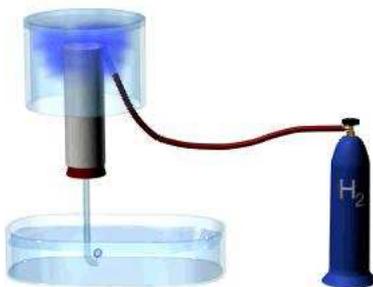


Abbildung 7.18: Screenshot aus der Animation zur Diffusion von Wasserstoff durch einen Tonzylinder

der Öffnung nach unten montiert) geleitet, unter dem sich ein Tonzylinder befindet. Auch der Tonzylinder ist mit der Öffnung nach unten montiert. In seiner Öffnung steckt ein durchbohrter Gummistopfen, aus dem ein Glasröhrchen in ein Wasserbad führt. Wenn Wasserstoff verwendet wird, sprudeln Gasblasen im Wasser, wenn Stickstoff verwendet wird, sprudelt es nicht.

Nachdem die Versuchsperson ihre Erklärung gegeben hatte, wurden vom Versuchsleiter noch einmal folgende Inhalte angesprochen, damit sich alle Versuchspersonen zu den entsprechenden Inhalten äußerten.

- Warum kann der violette Farbstoff durch den Dialysebeutel nach außen dringen, der gelbe jedoch nicht?
- Warum bewegt sich der violette Farbstoff überhaupt?
- Kommt die Bewegung der Farbstoffe nach einer längeren Zeit zur Ruhe?
- Stell dir vor, du könntest in einem miniaturvisierten U-Boot durch den Dialysebeutel fahren. Was alles kannst du beobachten?

Zweite Aufgabe

Zur zweiten Aufgabe lasen die Versuchspersonen folgenden Text und sahen ein Video beliebig oft an:

„In einem kleinen Glas sind einige Tropfen Tusche mit etwa 10-mal so viel Wasser gemischt worden. Ein Tropfen dieser Mischung ist auf eine kleine Glasplatte getupft worden. Diese Glasplatte wird unter ein Mikroskop eingespannt, das auf etwa 500-fache Vergrößerung eingestellt ist. Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit der durch das Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann. Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehschirm anschauen.“

Zusätzlich wurden den Versuchspersonen wieder um ihre Ideen zu folgenden Fragen gebeten, damit die Vorstellungen aller Teilnehmerinnen und Teilnehmer zu diesen Themen vorliegen.

- Warum zittern die Bröckchen der Tusche?
- Warum bewegen sich die Bröckchen überhaupt?
- Bewegen sich die Bröckchen nach längerer Zeit noch?

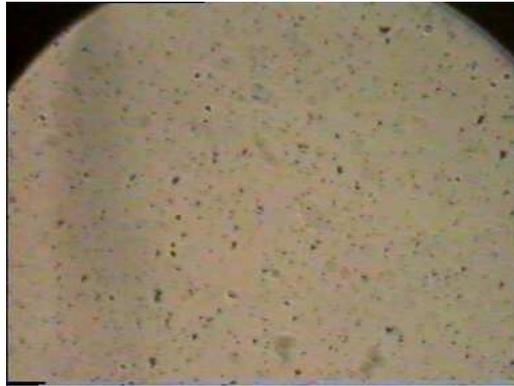


Abbildung 7.19: Screenshot aus dem Video zur Brownschen Bewegung von Tusche (verwendet als Prä-/Posttestaufgabe)



Abbildung 7.20: Screenshot aus dem Video zur Brown-schen Bewegung von Rauchteilchen in Luft (verwendet in der Lernphase)

Untersuchungsphase 3: Lernphase Zu Beginn der Lernphase lasen die Versuchspersonen einen Text, der sie in die Benutzung der Konstruktionsumgebung einführte. Die Versuchspersonen erhielten Gelegenheit, sich entweder eigenständig oder mit Unterstützung des Versuchsleiters in die Benutzung der Konstruktionsumgebung einzuarbeiten.

Anschließend lasen die Versuchspersonen den folgenden Aufgabentext mit Verweisen auf zwei Animation und ein Video (Screenshots folgen nach dem Text) und bearbeiteten die enthaltenen Aufgaben:

“Du erinnerst dich vielleicht, dass du letzte Woche 2 kleine Versuche mit deinen eigenen Ideen erklärt hast. Im einen Versuch waren 2 Farbstoffe in einem Kunststoffbeutel. Der violette Farbstoff drang durch den Beutel hindurch, der gelbe Farbstoff blieb im Beutel gefangen. Im anderen Versuch sahst du eine Videoaufnahme von in Wasser gelöster Tusche unter einem Mikroskop. Die Teilchen der Tusche zitterten in der Aufnahme hin und her. Heute sollst du 2 weitere Versuche bearbeiten. Im ersten Teil des ersten Versuchs wird ein Gas, Wasserstoff, unter einen umgedrehten Glasbecher geleitet. In dem Glasbecher befindet sich ein dicht geschlossener Tonzylinder, aus dem nach unten ein Glasröhrchen in ein Wasserbad führt. du kannst Dir in einer Animation (die Datei heißt ```H2.avi```) anschauen, was passiert, wenn du diesen Versuch in Wirklichkeit durchführen sollst.

Im zweiten Teil dieses Versuchs wird statt Wasserstoff ein anderes Gas, man nennt es Stickstoff, verwendet. Wieder kannst du in einer Animation (die Datei heißt ```N2.avi```) anschauen, was passiert, wenn du den Versuch in Wirklichkeit durchführst. Was kannst du beobachten? Welche Unterschiede kannst du beim Ablauf zwischen den beiden Versuchsdurchgängen beobachten? Bitte erkläre mir den Versuchsaufbau und die Beobachtungen. Nun sollst du auf eine andere Art eine Erklärung für diese beiden Beobachtungen finden, als du das letzte Woche getan hast. Diesmal sollst du nämlich Deine Erklärung mit dem Programm zusammenbauen, das du eben kennengelernt hast. Dem Programm ist eine ganz eigene Vorstellung von Stoffen eingebaut worden: Diese Vorstellung von Stoffen nimmt an (und das muss nicht unbedingt richtig sein), dass alle Stoffe aus kleinen Kugeln bestehen. Das heißt, dass alle Gase, alle flüssigen Stoffe und alle festen Stoffe aus kleinsten kugelförmigen Teilchen aufgebaut sind. Du sollst nun dieses Programm benutzen, um Dir mit dieser Vorstellung ein Modell des Versuchs zusammen zu bauen, den du eben gesehen hast. du sollst Dein eigenes Modell des Versuchs zusammen bauen und es dann starten. Das Modell soll sich so verhalten wie die beiden Gase im Versuch, den du in der Animation gesehen hast. Während du das Modell konstruierst, erkläre mir bitte immer laut, was du gerade tust und warum du es tust. Bitte fange mit dem ersten Teil des Versuchs an, in dem ja das Gas Wasserstoff benutzt wurde. du sollst in Deinem Modell nur zeigen, wie der Wasserstoff durch die Wand hindurch tritt. Die anderen Teile des Versuchsaufbaus kannst du weglassen. Wenn du mit dem Wasserstoff fertig bist, versuche bitte, mit dem Programm ein Modell des zweiten Teils des Versuchs zusammen zu bauen. In diesem zweiten Teil wurde ja statt Wasserstoff das Gas Stickstoff verwendet.

Im zweiten Versuch siehst du wieder ein Video. In eine henkleine Rauchkammer ist etwas Zigarettenrauch geblasen worden und die Kammer ist dann verschlossen worden. In der Kammer befindet sich jetzt also nur Zigarettenrauch und Luft. Die Rauchkammer wird unter ein Mikroskop gespannt und mit einem sehr starken Lichtstrahl durchleuchtet. Die Beobachtung wird durch eine spezielle Linse mit einer Videokamera aufgenommen. Den aufgenommenen Film kannst du im Programm mit dem Button ```Video``` starten und ansehen. Du sollst jetzt wieder das Programm benutzen, um ein Modell dieses Versuchs zusammenzubauen. Bitte erkläre mir wieder während jedes Konstruktionsschritts, was du gerade machst und warum du es machst.

Untersuchungsphase 4: Posttest Nach der Untersuchungsphase 3 schloss sich direkt der Posttest an. Es wurde das gleiche Verfahren und die gleichen Untersuchungsitems wie im Prätest verwendet.

7.4.3 *Ergebnisse*

Die Daten der Videos, die sich auf die Testphasen bezogen, wurden vor der weiteren Auswertung transkribiert. Im ersten eigentlichen Auswertungsschritt wird die inhaltliche „Korrektheit“ der ge-

gebenen Antworten im Prä- und Posttest sowie der Konstruktionen ausgewertet. Da die Test- und Lernaufgaben zur Brownschen Bewegung und zur „Diffusion“ in Test- und Lernphase sich jeweils bis auf Oberflächenmerkmale sehr ähnlich waren, wurden für sie fast identische Kriterien der „Richtigkeit“ gewählt. Der nächste Schritt der Auswertung bringt die Analogiebildung in Verbindung mit der „Richtigkeit“: Die Kriterien der „Richtigkeit“ können nämlich als komplexe Analogieübertragungen verstanden werden, deren einzelne Bestandteile im Falle einer „richtigen“ Lösung „korrekt“ sind. Welche Bestandteile dieser komplexen Analogie im Falle „falscher“ Erklärungen zu Problemen führen, ist eine wichtige Frage dieser Untersuchung.

7.4.3.1 Inhaltliche Korrektheitskriterien der Test- und der Konstruktionsaufgabe

Den Ergebnissen der Aufgabenanalyse folgend (siehe Abschnitt 2.1.2) werden in der folgenden Weise zunächst für die Prä- und Posttestaufgaben der „Gasdiffusion“ und der Brownschen Bewegung Korrektheitskriterien festgelegt. Es werden nur die zentralen Kriterien berücksichtigt, die auch von Anfängerinnen und Anfängern erfasst werden können. Denn viele Elemente der Aufgabenanalyse (z.B. experimentelles Design, Modelltheorie) liegen im Fortgeschrittenenbereich und werden von Anfängerinnen und Anfängern wahrscheinlich kaum erkannt werden können.

Bei der Kodierung der Laut-Denk-Protokolle werden, falls mehrere Lösungsansätze versucht wurden, jeweils die zuletzt geäußerten Interpretationen einer Aufgabe, bzw. der Konstruktion berücksichtigt. Im Folgenden werden die Kategorien aufgezählt, die in den Transkripten der Videoaufzeichnungen und den abgespeicherten Konstruktionen erfasst wurden.

Diffusionsaufgabe

Vergleich von Prä- und Posttest

- Annahme, dass die Teilchen des violetten Farbstoffs durch die Lücken des Diffusionsschlauchs passen und die des gelben Farbstoffs nicht.
- Annahme, dass sich die Teilchen des violetten Farbstoffs durch den Diffusionsschlauch bewegen.

Aufgaben der Konstruktionsphase („Gasdiffusion“ von Wasserstoff und Stickstoff durch einen Tonzylinder)

- Konstruktion, in der sich die Teilchen des Stickstoffs nicht durch den Tonzylinder bewegen können, weil sie zu klein für die Lücken sind.
- Konstruktion, in der sich die Teilchen des Wasserstoffs tatsächlich durch den Tonzylinder bewegen.

Aufgabe zur Brownschen Bewegung

Vergleich von Prä- und Posttest

- Annahme, dass die kleinsten Teilchen der Tusche durch permanente Zusammenstöße mit den kleinsten Teilchen des Wassers ihre Bewegungsrichtung ändern.

Aufgaben der Konstruktionsphase (Brownsche Bewegung von Zigarettenrauch in einer Rauchkammer)

- Konstruktion, in der die Teilchen des Zigarettenrauchs durch permanente Zusammenstöße mit den Teilchen der Luft andauernd ihre Bewegungsrichtung ändern.

Ergebnisse der inhaltlichen Korrektheitsanalyse

Diffusion von Farbstoffen (Prä- und Posttest) bzw. „Diffusion“ von Gasen (Konstruktionsphase)

Kriterium	Prätest		Konstruktion		Posttest	
	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
Gelbe Farbstoffteilchen (Stickstoffteilchen) bewegen sich nicht durch die Lücken des Dialyseschlauchs (Tonzyinders), weil sie zu groß für die Lücken sind.	6	10	12	4	9	7
Violette Farbstoffteilchen (Wasserstoffteilchen) bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs (Tonzyinders)	6	10	12	4	9	7

Tabelle 7.16: Inhaltliche Korrektheit der Items der Diffusionsaufgabe in Studie 3

Betrachtet man nur die summierten Werte der Tabelle 7.16, lösen 6 von 16 Versuchspersonen im Prätest die Diffusionsaufgabe mit der Annahme zweier verschieden großer Teilchensorten, in der Konstruktionsphase und im Posttest sind es 8 von 16 Versuchspersonen. Für sich betrachtet spricht dies zunächst für eine schwache Wirksamkeit des Arbeitens mit der Konstruktionsumgebung bei dieser Aufgabe: Während die Mehrheit der Versuchspersonen im Prätest noch keine „richtige“ Erklärung fanden, war das im Posttest der Fall. Da eine noch deutlichere Mehrheit in der Lernphase eine „richtige“ Konstruktion erstellte, lässt sich die Vermutung aufstellen, dass einige Versuchspersonen, die im Prätest keine Erklärung fanden, dies bei der Konstruktion eines Teilchenmodells erlernten und diese Erklärung im Posttest auf das Phänomen der Diffusion übertragen konnten.

Zur genaueren Bewertung der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung müssen aber die Änderungsverläufe der einzelnen Versuchspersonen betrachtet werden, denn es muss untersucht werden, ob der Zuwachs „richtiger“ Erklärungen im Posttest wirklich auf Versuchspersonen zurückzuführen ist, die diese Erklärungen erst beim Konstruieren eines Teilchenmodells erlernten. Dazu dient die folgende Kreuztabelle, in der die Posttestwerte für die Ausgangswerte im Prätest und für die Erfolgswerte in der Konstruktionsphase aufgeschlüsselt sind:

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Kategorie: Gelbe Farbstoffteilchen (Stickstoffteilchen) bewegen sich nicht durch die Lücken des Dialyseschlauchs (Tonzylinders)

In Tabelle 7.17 wird eine Kreuztabelle der Kategorien Prätest und Konstruktionsphase mit den Kategorien des Posttests für die Diffusionsaufgabe aufgeführt (hinter den Zahlen ist in Klammern die Verteilung auf die Geschichtenbedingungen angegeben in der Form: (Ballspielgeschichte/Fischfanggeschichte)).

Kriterium		Prätest	Posttest
		Prätest: Gelbe Farbstoffteilchen bewegen sich nicht durch die Lücken des Dialyseschlauchs, weil sie zu groß für die Lücken sind. Ja	Konstruktion: Stickstoffteilchen bewegen sich nicht durch die Lücken des Tonzylinders, weil sie zu groß für die Lücken sind. Ja
Prätest: Gelbe Farbstoffteilchen bewegen sich nicht durch die Lücken des Dialyseschlauchs, weil sie zu groß für die Lücken sind.	Konstruktion: Stickstoffteilchen bewegen sich nicht durch die Lücken des Tonzylinders, weil sie zu groß für die Lücken sind.	Ja	Nein
Ja	Nein	1 (1/0)	0 (0/0)
Ja	Ja	5 (3/2)	0 (0/0)
Nein	Nein	1 (1/0)	2 (0/2)
Nein	Ja	2 (1/1)	5 (3/2)

Tabelle 7.17: Inhaltliche Korrektheit der Items der Diffusionsaufgabe (Verhalten des gelben Farbstoffs) im Posttest aufgeschlüsselt nach Richtigkeit in Prätest und Konstruktionsaufgabe in Studie 3

In der vierten Zeile, sind die Fälle enthalten, die im Prätest die Aufgabe nicht richtig gelöst, in der Konstruktionsphase jedoch eine richtige Lösung erreicht haben: Von diesen 7 Versuchspersonen haben 2 mit der richtigen Lösung im Posttest geantwortet, 5 gaben eine falsche Lösung an, sind also als Fälle zu werten, die im Widerspruch zur Vermutung der Lernwirksamkeit der Konstruktionsumgebung stehen. Werden die 5 Fälle mit der falschen Lösung im Posttest einzeln betrachtet, so zeigen sich zum einen im Prätest Erklärungsversuche, die stark an makroskopisch-kontinuierlichen Vorstellungen orientiert sind. Diese Versuchspersonen übernahmen kaum Elemente der Analogiegeschichte in ihre Prätestlösungen. Im Posttest erinnerten die meisten dieser Versuchspersonen an ihre Lösungen vom Prätest und gaben diese wieder an. Dass 5 Versuchspersonen dieses Muster zeigen, weist darauf hin, dass das einmalige Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung bei einem Großteil der Versuchspersonen mit einer falschen Vorstellung im Prätest nicht zu Teilchenvorstellungen führt, die auf ähnliche Erklärungsaufgaben übertragen werden können. Eine Erklärungsmöglichkeit ist die Existenz von stark überlernten, robusten Alltagsvorstellungen bei diesen Jugendlichen, die mit einer Analogiegeschichte vor dem Vortest und einem einmaligen Arbeiten in der Konstruktionsumgebung nicht verändert werden.

In Zeile 1 finden sich ein nur unter Umständen gültiges Gegenbeispiel zur Vermutung, dass das Finden einer richtigen Lösung in der Konstruktionsumgebung sich „positiv“ auf den Posttest auswirkt:

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Es ist eine Versuchsperson, die im Prätest die richtige Lösung angab, im Konstruktionsstest keine richtige Lösung fand und im Posttest wieder die richtige Lösung angab. Bei dieser Versuchsperson hat das Verfehlen einer „richtigen“ Konstruktion in der Konstruktionsphase nicht dazu geführt, dass sie im Posttest eine „falsche“ Erklärung abgab. Diese „falsche“ Konstruktion wirkt aber auf den Posttest nicht zwingend genauso stark in der „negativen“ Richtung wie die „richtige“ Konstruktion auf den Posttest in „positiver“ Richtung, weshalb diese Versuchsperson nicht zwingend als Gegenbeispiel dienen kann.

In Zeile 2 sind die Versuchspersonen aufgeführt, die in Prätest und Konstruktionsphase eine richtige Lösung fanden. Sie antworteten alle im Posttest mit der richtigen Lösung. Die Konstruktionsumgebung zeigt in diesen Fällen keine negative Wirkung, die 5 Versuchspersonen dieser Zeile zeigen also keinen Widerspruch zur Vermutung der Lernwirksamkeit der Konstruktionsphase und stehen im Einklang mit der Vermutung.

Von den 3 Versuchspersonen, die im Prätest und in der Konstruktionsphase keine „richtige“ Teilchenvorstellung entwickelte, zeigte eine im Posttest eine richtige Lösung. Auch dieser Fall kann als Gegenbeispiel für die Vermutung der Lernwirksamkeit dienen. Diese Versuchsperson kam in der Konstruktionsphase bis zum Aufbau einer Tonwand mit Löchern, schaffte jedoch die Konstruktion unterschiedlich großer Teilchensorten nicht. Möglicherweise bildete sie unbewusst die Analogie (sie konnte beim Lösen der Posttestaufgabe allerdings nicht angeben, woher ihre Lösungsidee stammte) zur Konstruktionsaufgabe und fand spontan eine Lösung.

Kategorie: Violette Farbstoffteilchen (Wasserstoffteilchen) bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs (Tonzyinders)

Tabelle 7.18 enthält eine Kreuztabelle der Kategorien Prätest und Konstruktionsphase mit den Kategorien des Posttests für die Diffusionsaufgabe (hinter den Zahlen ist in Klammern die Verteilung auf die Geschichtenbedingungen angegeben in der Form: Ballspielgeschichte/Fischfanggeschichte)

Kriterium		Prä-test	Post-test
		Prätest: Violette Farbstoffteilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs	Konstruktion: Wasserstoffteilchen bewegen sich durch die Lücken des Tonzyinders.
Prätest: Violette Farbstoffteilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs.	Konstruktion: Wasserstoffteilchen bewegen sich durch die Lücken des Tonzyinders.	Ja	Nein
Ja	Nein	1 (1/0)	0 (0/0)
Ja	Ja	5 (3/2)	0 (0/0)
Nein	Nein	1 (1/0)	2 (0/2)
Nein	Ja	2 (1/1)	35 (3/2)

Tabelle 7.18: Inhaltliche Korrektheit der Items der Diffusionsaufgabe (Verhalten des violetten Farbstoffs) im Posttest aufgeschlüsselt nach Richtigkeit in Prätest und Konstruktionsaufgabe in Studie 3

Da für diese Variablen (violette Farbstoffteilchen/Wasserstoffteilchen) die gleichen Zahlen gelten wie oben, werden von diesen Versuchspersonen stets für beide Teilchensorten zusammen Lösungen

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

gefunden. Es gelten also dieselben Interpretationsmöglichkeiten wie oben.

Brownsche Bewegung von Tusche in Wasser (Prä- und Posttest) bzw. brownsche Bewegung von Rauch in Luft (Konstruktionsphase)

Kriterium	Prätest		Konstruktion		Posttest	
	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
Bewegungsänderungen der Tuscheteilchen/Rauchteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen/Luftteilchen	0	16	11	5	5	11

Tabelle 7.19: Inhaltliche Korrektheit der Items der Aufgabe zur Brownschen Bewegung in Prätest und Konstruktionsaufgabe in Studie 3

Bei der Experimentreihe zur Brownschen Bewegung zeigt sich ein anderes Bild (Tabelle 7.19): Im Prätest fand keine Versuchsperson die „richtige“ Erklärung, während dies im Posttest 5 Versuchspersonen gelang. Eine deutliche Mehrheit von 11 Versuchspersonen konstruierte in der Lernphase ein „richtiges“ Teilchenmodell. Wiederum muss die Vermutung der Lernwirksamkeit der Konstruktionsumgebung mit einer Verlaufstabelle untersucht werden, in der die „richtig/falsch“-Folgen der einzelnen Lösungen aufgeführt werden.

Kategorie: Bewegungsänderungen der Tusche(Rauch-)teilchen durch Kollisionen mit den Wasser(Luft-)teilchen Tabelle 7.20 enthält eine Kreuztabelle der Kategorien Prätest und Konstruktionsphase mit den Kategorien des Posttests für die Aufgabe zur Brownschen Bewegung (hinter den Zahlen ist in Klammern die Verteilung auf die Geschichtenbedingungen angegeben in der Form: (Ballspielgeschichte/Fischfanggeschichte)

Die Interpretation der Ergebnisse zur Brownschen Bewegung fällt einfacher als die der Diffusion. Im Prätest erklärte keiner der 16 Versuchspersonen die Brownsche Bewegung von Zigarettenrauch mit Teilchenkollisionen zwischen Luft und Rauchteilchen (Datenreihen 1 und 2 der Tabelle). Dieses Ergebnis kann 2 Gründe haben: Zum einen könnte die Aufgabe zu schwierig gewesen sein. Zum anderen kann es aber auch schwierig sein, die Analogie zwischen der Geschichte und der Brownschen Bewegung zu bilden, sodass die Versuchspersonen versuchen, Analogien mit makroskopischen Vorstellungen aus ihrem Alltag zu bilden. Diese Frage wird bei der Untersuchung der Analogiebildung noch einmal aufgenommen.

10 Versuchspersonen fanden im Vortest keine Lösung, konstruierten jedoch in der Konstruktionsumgebung eine Lösung, die auf Kollisionen von Luft- und Rauchpartikeln beruhte. Von diesen Versuchspersonen lösten 5 die Nachtestaufgabe mit Teilchenkollisionen, 5 fanden keine solche Lösung. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass das Konstruieren eines eigenen Teilchenmodells mit der Konstruktionsumgebung einfacher „richtige“ Analogien bilden lässt als das Lesen der Geschichte und dass damit insgesamt die Konstruktionsumgebung eine deutlich wirksamere Hilfe beim Bilden einer diskontinuierlichen Teilchenerklärung bei dieser Aufgabe ist als die Geschichte. Allerdings weisen die 5 Fälle, die nach dem „erfolgreichen“ Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung zu keiner „richtigen“ Erklärung der Brownschen Bewegung im Posttest kamen, darauf hin, dass die Wirksamkeit eingeschränkt ist. Hält man an der Hypothese des Analogielernens beim Erwerb des

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Kriterium		Prä-test	Post-test
		Posttest: Bewegungsänderungen der Tuscheteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen	Posttest: Bewegungsänderungen der Tuscheteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen
Prätest: Bewegungsänderungen der Tuscheteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen	Konstruktion: Bewegungsänderungen der Rauchteilchen durch Kollisionen mit den Luftteilchen	Ja	Nein
Ja	Nein	0 (0/0)	0 (0/0)
Ja	Ja	0 (0/0)	0 (0/0)
Nein	Nein	5 (3/2)	5 (3/2)
Nein	Ja	0 (0/0)	6 (3/3)

Tabelle 7.20: Inhaltliche Korrektheit der Items zur Brownschen Bewegung im Posttest

Teilchenmodells fest, so sind eventuell wieder robuste, stark überlernte Analogie aus dem Alltag auf die Posttestaufgabe übertragen worden, gegen die sich das Muster die Konstruktionslösung nicht durchsetzen konnte.

Die 6 Versuchspersonen, die weder im Prätest noch in der Konstruktionsumgebung eine diskontinuierliche Erklärung fanden, fanden auch im Posttest keine. Für einen Teil der Versuchspersonen war es also weder nach dem Lesen der Geschichte noch beim Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung möglich, eine diskontinuierliche Lösung zu finden. Dies kann wieder daran liegen, dass die Aufgabe zu schwierig ist, weil die Analogie zwischen der Geschichte bzw. dem Angebot der Konstruktionsumgebung und dem makroskopischen Phänomen besonders schwierig zu finden ist. Diese Ergebnisse der Erklärung der Brownschen Bewegung zeigen, dass

- für die diskontinuierliche Erklärung der Brownschen Bewegung die Konstruktionsumgebung eine eingeschränkt wirksame Hilfe ist.
- die diskontinuierliche Erklärung der Brownschen Bewegung mit Teilchenkollisionen schwieriger ist als die Erklärung der „Gasdiffusion“ durch ein Hindernis. Die Aufgabe könnte generell schwieriger sein, weil die initiale Analogiebildung für dieses Phänomen schwieriger sein als für die Diffusion.

Insgesamt stehen die Ergebnisse beider Aufgaben in eingeschränkter Übereinstimmung mit der Hypothese, dass die Konstruktionsumgebung hilft, Teilchenvorstellungen bei der Interpretation von makroskopischen Phänomenen einzusetzen.

Bei der Aufgabe zur Diffusion fällt die Verbesserung nach dem Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung relativ klein aus. Dies kann damit erklärt werden, dass hier schon nach dem Lesen der Geschichte relativ viele Versuchspersonen eine diskontinuierliche Erklärung finden. Hingegen hilft das Lesen der Geschichte nicht bei der diskontinuierlichen Erklärung der Brownschen Bewegung, die nach dem Konstruieren eines eigenen Teilchenmodells deutlich öfter mit diskreten Teilchenvorstellungen erklärt wird.

Insgesamt gelangt ein beträchtlicher Teil der Anfängerinnen und Anfängern auch im Posttest zu keiner Lösung der Aufgaben (bei der Diffusionsaufgabe 7 von 16, bei der Brownschen Bewegung

11 von 16 Versuchspersonen). Dies weist darauf hin, dass einmaliges Arbeiten mit dieser Umgebung zwar deutlich wirksam ist, ein beträchtlicher Teil der Versuchspersonen aber noch beträchtliche Schwierigkeiten hat: Entweder finden die Versuchspersonen weder durch Lesen einer analogen Geschichte noch durch das Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung eine diskontinuierliche Erklärungsmöglichkeit oder sie, können nach dem erfolgreichen Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung die gefundene Lösung nicht auf ein ähnliches Problem übertragen.

7.4.3.2 Betrachtung der verwendeten Analogien

Nach der Betrachtung der inhaltlichen Korrektheit der Aufgabenlösungen werden die Daten jetzt aus der Perspektive des Lernvorgangs, d.h. aus der Perspektive des Lernens mit Analogien beleuchtet. Während bei der inhaltlichen Korrektheitsanalyse nur die nach der Aufgabenanalyse gültige Hierarchie betrachtet wurde, spielen hier Elemente und Relationen eine Rolle, die beim Erlernen des Teilchenmodells mit Analogien aus anderen Bereichen eine Rolle spielen. Auf der einen Seite ist dies natürlich das jeweilige makroskopische Phänomen und die Teilchenerklärung, auf der anderen Seite aber auch die Quellbereiche der Analogien - hier die gelesenen Geschichten und das selbst konstruierte Simulationsmodell sowie die Regeln, die die Beziehungen zwischen beiden Strukturen beschreiben. Zunächst werden die Ergebnisse des Prätests untersucht, wo die Wirkung der zuvor gelesenen Geschichten auf das Lösungsverhalten der beiden Aufgaben untersucht wird.

Folgende Kategorien wurden erhoben:

- Bälle/Fische werden absichtsvoll durch die Agenten der Geschichte in Bewegung gesetzt.
- Bälle/Fische bewegen sich durch den Raum.
- Hindernis hat Lücken.
- Bälle/Fische treffen auf Hindernis.
- Kleine Bälle/Fische durchdringen Hindernis.
- Große Bälle/Fische durchdringen Hindernis nicht.

Im Folgenden werden die summierten Werte für das Auftreten der Kategorien berichtet.

Vergleich der analogen Übertragung zwischen Prä- und Posttest

Aufgabe zur Diffusion von 2 Farbstoffen durch einen Dialyseschlauch

Ergebnisse nach dem Lesen der Ballspielgeschichte (Tabelle 7.21)

Im Prätest benutzen nur 2 von 8 Versuchspersonen die von der anderen Analogiegeschichte sich unterscheidende Vorstellung, dass die Objekte (die Gasteilchen) durch andere Agenten analog zum Werfen in der Ballgeschichte in Bewegung gesetzt werden.

Da hingegen 7 Versuchspersonen annehmen, dass die Gasteilchen sich bewegen, scheinen mehrere gar keine oder andere Bewegungsursachen anzunehmen (nach der Bewegungsursache wurde explizit vom Versuchsleiter gefragt). 6 der Versuchspersonen nehmen an, dass die Teilchen auf den Dialyseschlauch Lücken ausweist und dass dieser Dialyseschlauch Lücken hat. Hingegen nehmen nur noch 4 Versuchspersonen analog der Geschichte an, dass die kleinen Teilchen (violetter Farbstoff) das Hindernis durchdringen und die großen Teilchen nicht hindurchdringen können.

Insgesamt scheint ein Teil der kausalen Ereigniskette der Geschichte zur Erklärung der Diffusion benutzt zu werden, allerdings wird die Bewegungsursache im Prätest kaum gebraucht.

Im Posttest benutzt keine Versuchsperson mehr die Vorstellung, dass die Teilchenbewegung analog zur Geschichte aktiv durch Agenten verursacht wurde. Hier scheint die Teilchenanalogie der

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Kategorie	Prätest		Post-test	
	Ja	Nein	Ja	Nein
Objekte werden durch Subjekte in Bewegung gesetzt	2	6	0	8
Objekte bewegen sich durch den Raum	7	1	6	2
Hindernis hat Lücken	6	2	7	1
Objekte treffen auf Hindernisse	6	2	5	3
Kleine Objekte durchdringen Hindernis	4	4	6	2
Große Objekte können Hindernis nicht durchdringen	4	4	6	2

Tabelle 7.21: Analoge Übertragungen bei der Lösung der Diffusionsaufgabe im Prätest nach dem Lesen der Ballspielgeschichte in Studie 3

Computersimulation diese Vorstellung verdrängt zu werden. Auffällig ist, dass jetzt 6 von 8 Versuchspersonen zu einer Erklärung gelangen, die der Simulation entspricht.

Einer der Versuchspersonen, die ihre Bearbeitung geändert haben, hat während beim Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung die Lösung mit den Lücken im Hindernis gefunden und diese Lösung dann auf die Posttestaufgabe übertragen:

Die letzte Passage beim Lösen der Diffusionsaufgabe im Prätest (der Interviewer hatte den Versuchspersonen gebeten, sich in einem Mini U-Boot vorstellen, das durch den Farbstoff im Beutel bis zum Dialyseschlauch fährt):

Otto:

„Da kommt halt Farbe raus und das Wasser, das... das Wasser... das löst sich... nee nicht das Wasser, die Farbe löst sich auf. Und das geht halt überall hin und das wird halt dann so lilafarbig.“

Interviewer:

„Du bist unten immer noch an dem Loch. Was ist mit dem gelben Farbstoff?“

Otto:

„Das bleibt halt nicht oben. Oder soll das auch runtergehen?“

....

„Weil er leichter ist als das Wasser. Und das gibt halt... Luft... Wenn man Luft da reinmacht, dann geht das ja auch nicht runter.“

Dagegen seine letzte Aussage im Posttest:

„Wie ich es schon gesagt hab: Ist doch ein Spezialschlauch. Vielleicht sind da Große,... nicht Sichtbare, und so... wie soll ich es sagen...

Kleine Löcher, ein kleines Loch, viele Löcher drin sind.

Und dass die Farbe... die Teilchen von der Farbe sind, halt klein, sehr klein. Dass die halt durchkommen durch den Schlauch. Und ins Wasser.“

Die andere Versuchsperson nimmt am Ende des Posttests im Unterschied zum Prätest unterschiedlich große Teilchen für die beiden Farbstoffe an, ohne die komplett richtige Lösung in der Konstruktionsumgebung konstruiert zu haben. In der Konstruktionsumgebung konstruierte sie zwar eine Teilchenwand mit Lücken (für die Tonwand), sie fand jedoch nicht zur Darstellung von

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

unterschiedlichen Teilchengrößen für die beiden Gase.

Im Posttest fand sie dann spontan die Lösung mit unterschiedlich großen Farbteilchen:

Im Prätest äußerte sie sich folgendermaßen:

Ina: „Also, der Schlauch der ist so durchsichtig, robust ist jetzt wieder, so robust und doch biegsam, und doch trotzdem, dass nichts kaputtgeht, wenn ich ihn biege, so irgendwie.“

Interviewer: „Elastisch?“

Ina: „Ja, genau.“

Interviewer: „Wie der lila Farbstoff durchgeht, kannst du dir nicht vorstellen?“

Ina: „Nein“

Im Posttest antwortete sie zum Schluss folgendermaßen:

Ina: „Löcher, also da sieht man vielleicht kleine Löcher. Und da unten ist halt alles dunkel und dann und dann würde ich da so kleine ganz, ganz, ganz kleine, noch kleinere Partikel sehen.“

Interviewer:

Und die gehen da durch?

Ina: „Wo gehen da durch. Die gehen durch das Loch durch, durch die Maschen durch. Aber bloß die lila.“

Interviewer: Und die Gelben?

Ina: „Die sind zu groß, die bleiben drin.“

Fischfanggeschichte

Kategorie	Prätest		Posttest	
	Ja	Nein	Ja	Nein
Objekte setzen sich willkürlich in Bewegung	0	8	0	8
Objekte bewegen sich durch den Raum	6	2	3	5
Hindernis hat Lücken	3	5	7	1
Objekte treffen auf Hindernisse	2	6	4	4
Kleine Objekte durchdringen Hindernis	2	6	2	6
Große Objekte können Hindernis nicht durchdringen	2	6	2	6

Tabelle 7.22: Analoge Übertragungen bei der Lösung der Diffusionsaufgabeim Prätest nach dem Lesen der Fischfanggeschichte in Studie 3

In der ersten Kategorie der Tabelle 7.22, die erfasst, inwieweit die Bewegungsursache von der Fischfanggeschichte auf die Diffusion übertragen wurde, hat keine Versuchspersonen die Bewegungsursache der Geschichte, nämlich die selbst gesteuerte Bewegung der Fische, auf die Farbstoffteilchen der Diffusion übertragen.

Während im Prätest noch 6 Versuchspersonen annehmen, dass die Objekte sich durch den Raum bewegen, nehmen nur noch wenige Versuchspersonen an, dass die Objekte auf ein Hindernis mit Lücken stoßen und nur noch 2 äußern, dass die kleinen Teilchen durch das Hindernis dringen, die Großen jedoch nicht.

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Im Posttest zeigt sich ein unerwartetes Ergebnis in der zweiten Kategorie der Tabelle (Objekte bewegen sich durch den Raum), weil hier nur 3 Versuchspersonen annehmen, dass sich Objekte bewegen. Bei den anderen Kategorien verwenden deutlich mehr Versuchspersonen die Analogie der Konstruktionsumgebung, dass das Hindernis Lücken aufweist und dass die Teilchen auf das Hindernis treffen. Allerdings haben nach dem Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung genauso viele (genau dieselben) Versuchspersonen die Analogie verwendet, dass die kleinen Teilchen das Hindernis durchdringen und die großen nicht.

Aufgabe zur Brownschen Bewegung von Zigarettenrauch in einer Rauchkammer Ballspielgeschichte (Tabelle 7.23)

Kategorie	Prätest			Posttest		
	Ja	Nein	Fehlend	Ja	Nein	Fehlend
Objekte werden durch Agenten in Bewegung gesetzt	3	5	0	0	8	0
Objekte bewegen sich durch den Raum	8	0	0	8	0	0
Objekte kollidieren	0	8	0	3	5	0
Objekte ändern Bewegungsrichtung	0	8	0	3	5	0

Tabelle 7.23: Analoge Übertragungen bei der Lösung der Aufgabe zur Brownschen Bewegung im Prätest nach dem Lesen der Ballspielgeschichte in Studie 3

Beim ersten Glied der Kausalkette, der Bewegungsursache, zeigt sich wie bei der Diffusionsaufgabe, dass ein Teil der Versuchspersonen im Prätest die Analogie aus der Geschichte wählt, nach dem Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung im Posttest verwendet aber keine Versuchsperson diese Analogie mehr. Im Prätest und Posttest nehmen alle Versuchspersonen an, dass die Teilchen sich bewegen. Bei den beiden letzten Gliedern der Kausalkette benutzt allerdings im Vortest keine Versuchsperson die Vorstellungen der Ballgeschichte, während nach dem Arbeiten mit der Simulationsumgebung 3 von 8 Versuchspersonen den Mechanismus benutzen, den sie in der Simulationsumgebung benutzt haben.

Fischfanggeschichte

Nach der Fischfanggeschichte zeigen sich sehr ähnliche Ergebnisse wie nach dem Lesen der Ballspielgeschichte (Tabelle 7.24). Bei der Bewegungsursache benutzt eine Versuchsperson weniger die Vorstellung der Fischfanggeschichte und alle Versuchspersonen sehen die Tuschepartikel in Bewegung. Bei den beiden letzten Gliedern der Kausalkette, die sich auf die Kollisionen von Objekten und die entsprechende Änderung der Bewegungsrichtung beziehen benutzt wiederum im Vortest keine Versuchsperson die Vorstellung der Geschichte, während nach dem Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung hier 2 Personen eine veränderte Vorstellung zeigen, die der konstruierten Lösung in der Konstruktionsumgebung entspricht.

Vergleich der analogen Übertragung zwischen den beiden verschiedenen Geschichtenbedingungen im Prätest

Kapitel 7. Drei empirische Studien zur Überprüfung des Lernmodells und der Wirksamkeit der Konstruktionsumgebung

Kategorie	Prätest			Post-test		
	Ja	Nein	Fehlend	Ja	Nein	Fehlend
Objekte werden durch Agenten in Bewegung gesetzt	2	6	0	1	7	0
Objekte bewegen sich durch den Raum	8	0	0	8	0	0
Objekte kollidieren	0	8	0	2	6	0
Objekte ändern Bewegungsrichtung	0	8	0	2	6	0

Tabelle 7.24: Analoge Übertragungen bei der Lösung der Aufgabe zur Brownschen Bewegung im Prätest nach dem Lesen der Fischfanggeschichte in Studie 3

Nach dem Lesen der Ballspielgeschichte übertrugen die Versuchspersonen bei der Diffusionsaufgabe in stärkerem Maße Vorstellungen aus der Geschichte im Prätest. In der Kausalkette tritt der deutliche Unterschied zum ersten Mal bei der Beschreibung des Dialyseschlauchs auf: Hier übertrugen 6 Versuchspersonen bei der Ballspielbedingung, aber nur 3 bzw. 2 unter der Fischfangbedingung. Entsprechend übertrugen in der Ballspielbedingung 4 Versuchspersonen die beiden letzten Glieder (kleine Fische/Teilchen dringen durch das Netz/den Dialyseschlauch bzw. große Fische/Teilchen dringen nicht durch das Netz/den Dialyseschlauch).

Bei der Aufgabe zur Brownschen Bewegung liegt das Niveau der analogen Übertragungen und auch der Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen niedriger. Die Bewegungsursachen wurden bei der Ballspielbedingung in 3 Fällen übertragen, bei der Fischfangbedingung in 2. Ansonsten übertrugen gleich viele Versuchspersonen Vorstellungen aus der Quell- auf die Zielstruktur (im Fall der Kollisionen und der resultierenden Richtungsänderungen sind es unter beiden Bedingungen keine Versuchspersonen).

Der Grund für diesen Unterschied (der bei den niedrigen Versuchspersonenzahlen natürlich mit großer Zurückhaltung interpretiert werden muss) könnte darin liegen, dass die wichtigen Elemente der Fischfanggeschichte, Fische und die Fischerin, als Lebewesen den Farbstoffen doch als weniger ähnlich empfunden werden als die Bälle des Ballspiels.

Vergleich der analogen Übertragung zwischen den beiden Aufgaben des Prätests und des Posttests

Nach dem Lesen beider Geschichten übertrugen die Versuchspersonen die Ursache der Ball- bzw. Fischbewegungen praktisch nicht auf den Diffusionsversuch und die Brownsche Bewegung. Das nächste Glied der Erklärungskette hingegen, die Bewegung der Teilchen, beschreiben die Versuchspersonen analog zu den Geschichten. Das erwartungswidrige Resultat für die Bewegungsursachung könnte damit erklärt werden, dass sowohl die Stoffbewegung als auch die Bewegung der Tuschebröckchen in beiden Versuchen makroskopisch klar erkennbar ist, während die Verursachung der Bewegungen in keiner der beiden makroskopischen Umgebungen beobachtet werden kann. Diese Wahrnehmbarkeit unterstützt die Bindung von Relationen der Quell- mit den Entsprechungen der Zielstruktur.

Kapitel 8

Kognitive Modellierung von Analogiebildung und Erklärungsfindung in der Studie 3

Dieses Kapitel stellt die Interpretation der dritten Studie des empirischen Teils mithilfe einer kognitiven Computersimulation vor.

8.1 Einführung

Nach der Beschreibung der empirischen Ergebnisse der Studie 3 zum Lernen und Problemlösen mit Analogien wird in diesem Kapitel eine mögliche theoretische Deutung der prägnanten Ergebnisse mittels einer kognitiven Simulation entwickelt.

Ziel ist es zu untersuchen, unter welchen Annahmen und wie weitreichend eine kognitive Computersimulation - bestehend aus einem Zusammenspiel der Modelle ACME und ECHO - in der Lage ist, die prägnanten empirischen Ergebnisse der Studie zu generieren (s.nächster Abschnitt). Dem Ziel der Studie 3 entsprechend (zu untersuchen, ob und in welchem Ausmaß angebotene unterschiedliche Analogien einen Einfluss auf die Erklärung von Stoffphänomenen haben), sollen die Simulationen zeigen, ob überhaupt, unter welchen Voraussetzungen und auf welche Weise ein Zusammenspiel der beiden Modelle von Analogiebildung und Erklärungsfindung in der Lage ist, die Ergebnisse der Studie zu generieren. Es werden hier also nur die Resultate der Analogiebildung nach dem ACME-Modell und ihre Auswirkungen auf die Erklärungsgenerierung mit dem ECHO-Modell untersucht, eine psychologisch ins Einzelne gehende Beschreibung des Analogiebildungsprozesses selbst (z.B. zeitlich differenzierte Untersuchung der Analogiebildung, Auswirkungen von beschränkten Informationsverarbeitungskapazitäten der Versuchspersonen auf die Analogiebildung, Verallgemeinerung der gefundenen Lösungen, etc.) überschreitet den Rahmen dieser Arbeit und muss späteren Studien überlassen werden. Der Einsatz der kognitiven Simulationen dient also im Rahmen dieser Arbeit zur Untersuchung und Ausarbeitung einer Theorie des analogen Lernens beim Erwerb des Teilchenmodells, nicht zur Überprüfung eines bereits fertig entwickelten theoretischen Ansatzes.

Gelingt es, die zentralen Ergebnisse der Aufgabenlösungen im Prätest und im Posttest zu generieren, nachdem die Modellierung des Lernens durch Analogie nach dem Lesen der Geschichte und später nach dem Konstruieren eines Teilchenmodells einen Wissenszuwachs gezeigt hat, wäre das ein Hinweis, dass unter den Voraussetzungen der gegebenen Studie der kognitive Mechanismus der Analogiebildung des ACME-Modells im Zusammenspiel mit dem Modell der Erklärungsfindung ECHO eine Möglichkeit darstellt, kognitionspsychologisch grundlegende Aspekte des Teilchenmodellerwerbs hinreichend (nicht notwendig) zu erklären. Nähme man danach die Modellbildung

durch den Lernmechanismus der Analogiebildung als zentralen kognitiven Lernweg beim Erwerb des Teilchenmodells an, könnten Simulationen „misslungener“ Analogiebildung und der daraus resultierenden „falschen“ Erklärung Hinweise darauf geben, warum und wie solche nicht angestrebten Modelle gebildet und wie sie letztlich vermieden werden können.

Um den Aufwand in vertretbaren Rahmen zu halten, wird nicht versucht, jeden Einzelfall nachzubilden, sondern die zentralen Tendenzen der empirischen Daten in prototypischen Lern- und Erklärungsfällen zu erfassen. Für dieses Vorgehen spricht zusätzlich, dass zur Simulation von Einzelfällen über den individuellen Wissensstand vor Beginn der Simulation Annahmen gemacht werden müssten, über die keine empirischen Daten erhoben werden und dass Generalisierungsprobleme bei der Untersuchung von Einzelfällen reduziert werden.

Für den Prozess der Analogiebildung wird das konnektionistische Modell ACME (Holyoak & Thagard, 1989, siehe oben), für das Problemlösen nach der Analogiebildung das konnektionistische Modell ECHO verwendet (Thagard, 1989) verwendet. Beide benutzten Modelle sind zwar schon älter, erfüllen den begrenzten Zweck der Simulation aber ausreichend. Zudem gehören sie zu den bekanntesten und meistgebrauchten Modellen zur Analogiebildung und Simulation von Erklärungsprozessen. Feinheiten und weitergehende Aspekte der Analogiebildung - z.B. ihr zeitlicher Verlauf, die Berücksichtigung von Beschränkungen der kognitiven Kapazität oder die Bildung von Schemata als Verallgemeinerungen mehrerer gebildeter Analogien - übersteigen die Zielsetzung dieser Arbeit (nämlich zu zeigen, dass Lernen mit Analogien prinzipiell ein zentraler Mechanismus beim Erwerb des Teilchenmodells sein kann) und bleiben späteren Untersuchungen vorbehalten. Empirische Ergebnisse der Studie 3, deren kognitives Zustandekommen mithilfe der Simulation untersucht werden soll.

8.2 Charakterisierung der zu simulierenden prototypischen Versuchsperson

Der Prototyp der kognitiven Simulation einer vorhergehenden empirischen Untersuchung stellt die mittleren Tendenzen dieser Untersuchung bezüglich des Untersuchungsziels dar (Wallach, 1998). Die Charakterisierung des Prototyps ist also durch das Ziel der Studie 3 bestimmt, nämlich zu untersuchen, welchen Einfluss zwei nacheinander angebotene unterschiedliche Analogien (zunächst eine gelesene Geschichte, dann ein selbst konstruiertes Teilchenmodell eines Phänomens) auf die Erklärungsfindung zweier Stoffphänomene nehmen. Versuchspersonen, die keine der beiden angebotenen Analogien für die Erklärung der Testexperimente benutzten, können zur Untersuchung des Analogiebildungsprozesses nicht herangezogen werden, da keine Erhebung über das Alltagswissen der Versuchspersonen angestellt wurde, das hier eventuell zu Übertragungen herangezogen wurde.

Die meisten Versuchspersonen der Untersuchung benutzten die Geschichten nicht als Analogiequelle bei der Brownschen Bewegung und uneinheitlich als Analogiequelle bei der Diffusion. Sie konstruierten ein „richtiges“ Teilchenmodell des Lernphasenexperiments und benutzten diese Lösung insgesamt erfolgreicher, aber wiederum uneinheitlich in beiden Posttestaufgaben. Ein prototypischer Fall dieser Studie 3 sollte also nach dem Lesen der Geschichte mehr Schwierigkeiten bei der analogen Übertragung der Geschichte auf das Testexperiment zur Brownschen Bewegung haben und nach dem erfolgreichen Konstruieren in der Lernphase diese „richtige“ Lösung erheblich besser auf die beiden Testexperimente übertragen können. Die genaue Bestimmung der Simulationsziele folgt im nächsten Abschnitt.

8.3 Ziele der Simulation

Um eine einfache Übersicht der hier bedeutsamen Ergebnisse der Studie 3 zu liefern, werden noch einmal in den Tabellen 8.1 und 8.2 die Ergebnisse zur „Richtigkeit“ des Posttests der beiden

Aufgabentypen tabellarisch aufgeführt, aufgeschlüsselt nach der „Lösungsrichtigkeit“ im Prätest und in der Lernphase.

		Posttest: Violette Farbstoff- teilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs, gelbe nicht.	Posttest: Violette Farbstoff- teilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs, gelbe nicht.
Prätest: Violette Farbstoff- teilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs, gelbe nicht.	Konstruktion: Violette Farbstoff- teilchen bewegen sich durch die Lücken des Dialyseschlauchs, gelbe nicht.	Ja	Nein
Ja	Nein	1 (1/0)	0 (0/0)
Ja	Ja	5 (3/2)	0 (0/0)
Nein	Nein	1 (1/0)	2 (0/2)
Nein	Ja	2 (1/1)	5 (2/3)

Tabelle 8.1: „Richtigkeit“ der Posttestlösung der Diffusionsaufgabe in Abhängigkeit von der „Richtigkeit“ der Prätest- und der Lernaufgabe

Für folgende auffälligen Aspekte des kognitiven Verhaltens der Schülerinnen und Schüler in der Studie 3 sollen durch die prototypischen Simulationen (nach dem Lesen der beiden Geschichten und für die beiden Experimenttypen) mögliche Erklärungen im Rahmen der Modelle ACME und ECHO angeboten werden:

8.3.1 Die Bildung analoger Beziehungen zwischen der jeweils gelesenen Geschichte und den Prä-/Posttestaufgaben und Unterschiede zwischen der Analogiebildungen der beiden Aufgaben

Die Analogiebildung mit ACME soll zeigen, dass die Analogiebildung nach dem Lesen der beiden Geschichten entsprechend dem empirischen Datensatz insgesamt nur bei einer Minderheit der Versuchspersonen (6 von 16) zu den erwarteten analogen Beziehungen führt. Die Mehrheit der Versuchspersonen zeigt nicht die Übertragung der erwarteten diskreten Strukturen aus den Geschichten auf die Testaufgaben und damit auch nicht die geschichtenspezifischen Merkmale bei der Lösung der Testaufgaben. Deshalb wird im Folgenden die Unterscheidung nach der gelesenen Geschichte nur nachrangig betrachtet.

Während bei der Diffusionsaufgabe in 6 von 16 Fällen Analogien bei der Aufgabenlösung eine Rolle spielten, bildet keine der Versuchspersonen bei der Aufgabe zur Brownschen Bewegung die bei der Geschichtenkonstruktion intendierte Analogie zwischen den kollidierenden Bällen und den Farbstoffteilchen. Die Modellierung soll einen Hinweis darauf geben können, warum die Versuchspersonen bei der Brownschen Bewegung große Schwierigkeiten mit dieser Analogiebildung haben.

		Posttest: Bewegungsänderungen der Tuschteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen	Posttest Bewegungsänderungen der Tuschteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen
Prätest: Bewegungsänderungen der Tuschteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen	Prätest: Bewegungsänderungen der Tuschteilchen durch Kollisionen mit den Wasserteilchen	Ja	Nein
Ja	Nein	0 (0/0)	0 (0/0)
Ja	Ja	0 (0/0)	0 (0/0)
Nein	Nein	5 (2/3)	5 (3/2)
Nein	Ja	0 (0/0)	6 (3/3)

Tabelle 8.2: „Richtigkeit“ der Posttestlösung der Aufgabe zur Brownschen Bewegung in Abhängigkeit von der „Richtigkeit“ der Prätest- und der Lernaufgabe

8.3.2 Die Bildung zusätzlicher analoger Beziehungen nach einer erfolgreichen Lernphase zwischen einer „richtigen“ Lösung der Modellierungsprobleme und den Prä-/Posttestaufgaben.

Die Simulation soll zeigen, dass bei beiden Aufgaben nach der Arbeit mit der Simulationsumgebung im Falle „richtiger“ Lösungen Analogien mit den Testaufgaben gebildet werden, bei denen das Verhalten der Kugeln in der Modellierungsumgebung durch eine Analogiebeziehung mit dem Verhalten der kleinsten Farbstoffteilchen in der Prätestaufgabe verbunden ist.

8.3.3 “Richtigere“ Erklärung Testaufgaben im Posttest unter Berücksichtigung der analogen Beziehungen aus beiden Quellbereichen (der jeweils gelesenen Geschichte und der erfolgreichen Bearbeitung der Modellierungsaufgaben).

Hier sollte die Simulation zeigen, warum im Posttest bei beiden Aufgaben eher Lösungen mit Verwendung des Teilchenmodells angegeben werden als im Prätest. Insbesondere soll die Simulation einen Hinweis darauf geben, warum im Falle der Test- bzw. Lernaufgabe zur Brownschen Bewegung überhaupt erst nach der Arbeit mit der Simulation die erwünschten Lösungen mit dem Teilchenmodell erreicht wurden.

8.3.4 Ein Teil der Versuchspersonen überträgt die richtige Lösung der Lernphase nicht.

Die Simulation soll einen Hinweis darauf geben, warum bei beiden Aufgaben ein Teil der Probandinnen und Probanden, die in der Konstruktionsphase eine Lösung mit dem Teilchenmodell der Modellierungsumgebung erreicht haben, keine diesem Teilchenmodell analoge Lösung angaben.

8.4 Annahmen zu den Lern- und Erklärungsvorgängen von ACME und ECHO in dieser Studie

8.4.1 Modellbildung durch Mechanismen der Analogiebildung bei andersweltlichen Modellen

Die kognitive Simulation soll einen kognitiven Lernweg aufzeigen, auf dem die Versuchspersonen von makroskopischen Alltagsvorstellungen ausgehend zu „richtigen“ Lösungen der Testaufgaben mithilfe des Teilchenmodells kommen können. Eine „richtige“ Lösung mithilfe von analogen Lernmechanismen zu finden, birgt aber Schwierigkeiten, die schon in den vorangegangenen Kapiteln angesprochen wurden:

Zunächst bedingt die Andersartigkeit von makroskopischer und submikroskopischer Teilchenwelt, dass einige Eigenschaften beider Welten nicht als ähnlich erkannt werden, obwohl sie nach dem wissenschaftlich „richtigen“ Teilchenmodell durch Modellbeziehungen miteinander verbunden sind, und dass deshalb von den Versuchspersonen nicht ohne weiteres Modellbeziehungen aufgebaut werden können (z.B. zwischen makroskopischer Temperatur und submikroskopischer kinetischer Teilchenenergie), während solche Beziehungen zwischen anderen Eigenschaftspaaren auf der Phänomen- und der Modellebene jedoch möglich sind (z.B. Masse und Gesamtenergie auf beiden Seiten). Da diese Probleme qualitativ deutlich unterschiedlicher Eigenschaften zwischen beiden Welten offensichtlich für den initialen Umgang mit dem Teilchenmodell ungeeignet sind, konzentriert sich Studie 3 auf Eigenschaften, die in beiden Welten eher ähnlich sind. Prinzipiell aber sollten auch Modellbeziehungen zwischen semantisch unterschiedlichen Objekten und Eigenschaften in Phänomen- und Modellwelt mit dem Modell ACME hergestellt werden können, weil außer den semantischen Ähnlichkeiten von ACME auch syntaktische und pragmatische Ähnlichkeiten verwandt werden und ähnliches Verhalten der angesprochenen Objekte beider Welten (z.B. Ansteigen der durchschnittlichen kinetischen Energie eines Teilchensystems proportional zum Ansteigen der Stofftemperatur) die Bildung einer Modellbeziehung zwischen den Objekten selbst nahe legt. Wie oben erwähnt, hat ACME den Vorteil, dass es Analogien nicht nur bei strikt geltenden Voraussetzungen bildet, sondern auch beim Vorliegen nur eines Teils der Voraussetzungen dazu in der Lage ist.

Manchmal ergeben sich aber auch in den leichteren Erklärungsaufgaben (wenn die entscheidenden Modellbeziehungen ähnliche Eigenschaften in beiden Welten verbinden) Schwierigkeiten: In der Testaufgabe zur Brownschen Bewegung von Rauchteilchen beispielsweise lassen die Eigenschaften der submikroskopischen Luftteilchen kaum mit der makroskopischen Luft durch analoge Verknüpfungen verbinden, weil die makroskopisch stehende Luft als wichtiger Teil der experimentellen Situation oft gar nicht bemerkt wird.

Solche Unähnlichkeiten zwischen den Bereichen können beispielsweise dazu führen, dass

1. entweder die Lernenden gar keine analogen Beziehungen mit der geplanten Analogie aufbauen,
2. oder dass aufgrund zufälliger struktureller (syntaktischer) Ähnlichkeiten zwischen den Bereichen Eigenschaften als analog angenommen werden, die inhaltlich „sinnlos“ sind. Z.B. könnten Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgrund ihres ähnlichen syntaktischen Aufbau zwischen makroskopischem Phänomen und gelesener Geschichte als analog eingestuft werden, obwohl die beschreibende Ursache-Wirkungsbeziehung des makroskopischen Experiments von ihrem Bedeutungsgehalt her keine sinnvolle Analogie zur entsprechenden Beziehung der Geschichte bildet,
3. oder dass die Lernenden ganz andere Analogien aus ihrem Erfahrungsbereich als Quellbereiche zur Erklärung benutzen.

Da Analogien zwischen Ursache-Wirkungs-Propositionen höherer Ordnung die Bildung von analogen Beziehungen zwischen den in sie involvierten weiteren Propositionen und Objekten verstärken,

entsteht in der Folge leicht eine zusammenhängende Gruppe „falscher“ Objektzuordnungen. Inhaltlich „richtige“ Beziehungen zwischen den beiden in vielerlei Hinsicht unterschiedlichen Welten lassen sich dementsprechend leichter bilden, wenn sich für alle wichtigen Punkte einer Teilchenklärung des Stoffphänomens auf beiden Ebenen wahrgenommene Elemente finden lassen, die sich ähnlich und die gleichzeitig durch inhaltlich „richtige“ Modellrelationen verbunden sind. Es gibt aber kaum Quellbereiche aus dem Alltag für die Analogiebildung eines Erklärungsmodells auf der Teilchenebene, die diese Bedingungskombination erfüllen. Zusammenfassend ist damit folgende Schwierigkeit entstanden: Dem zu erklärenden Phänomen ähnliche Quellbereiche enthalten oft nicht die teilchenähnlichen Eigenschaften, die zu den „richtigen“ Analogiebeziehungen führen, während Quellbereiche mit teilchenähnlichen Eigenschaften dem zu erklärenden Phänomen oft zu unähnlich sind. Wie lässt sich diese Schwierigkeit umgehen?

Im Unterricht wird meist eine erste Verbindung zwischen den Stoffphänomenen und den Modellvorstellungen des Teilchenmodells zumindest teilweise durch Instruktion oder andere Suggestionen nahe gelegt, weil es - wie oben gezeigt - kaum geeignete Quellbereiche gibt, deren Eigenschaften weitgehend übertragbar sind. In der vorliegenden Untersuchung wird den Lernenden das „richtige“ Modell nahe gelegt, indem in der Konstruktionsumgebung nur Erklärungen durch lauffähige Teilchenmodelle erzeugt werden können, während andere denkbare Erklärungen nicht konstruierbar sind.

Wenn dann einmal die Modellbeziehung zwischen dem Teilchenmodell und einem Phänomen erzeugt ist und es von den Lernenden akzeptiert wird, dass alle Stoffphänomene solche Modellbeziehungen erlauben, dann können anhand dieses Erklärungsbeispiels wesentlich komplexere Analogien gebildet werden: Jetzt kann nämlich eine Analogie zwischen dem kompletten Erklärungsbeispiel (bestehend aus Experiment und dem über Modellrelationen verknüpften Teilchenmodell des Experiments) gebildet werden. Die Vertreter des fallbasierten Erklärens (s. z.B. Reimann, 1997) würden hier allerdings nicht mehr von einer Analogie sondern von einem verwandten Begriff, einem so genannten „Fall“, einem Lösungsbeispiel einer kompletten Erklärungsaufgabe, sprechen. Zumindest im vorliegenden Fall können Analogiemechanismen von ACME aber auch die Anwendung des Erklärungsbeispiels aus der Lernphase auf den Posttest darstellen.

Dass die Aufgabe des Posttests (nach dem Arbeiten mit dem sehr ähnlichen Problem der Lernphase) deutlich besser gelöst wird, als die gleiche Aufgabe im Prätest, kann also daran liegen, dass vor dem Prätest nur die Analogie zur gelesenen Geschichte vorlag, die zu wenigen „richtigen“ und einigen „falschen“ Übertragungen führte, während nach dem Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung ein kompletter „richtiger“ Erklärungsfall gebildet worden war, der auf das analoge Experiment des Posttests übertragen wurde.

Zur Erzeugung eines solchen kompletten Erklärungsfalls sind auch andere Zugänge möglich, beispielsweise:

- Durch direkte Instruktion wie in vielen Schulbüchern,
- Über einen Weg, der das Lernen über den Modellbegriff selbst stärker in den Mittelpunkt stellt (Mikelskis-Seiffert, 2002),
- Über einen Zugang, der die Systemeigenschaften der unterschiedlichen Ebenen, ihren Vergleich und ihre Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede in den Mittelpunkt stellt. (z.B. Buck, Rehm, Seilnacht, 2004).

Für jede Zugangsvariante muss allerdings an einem bestimmten Punkt für ein Phänomen die entsprechende Teilchenklärung gefunden werden, wenn wissenschaftlich „korrekte“ Teilchenklärungen für Phänomene Bestandteil des jeweiligen Zugangs sein sollen. An diesem Punkt werden die Überlegungen aktuell, die in dieser Arbeit angestellt werden. Es ist eine grundlegende Hypothese dieser Arbeit, dass - egal auf welche Art die Beziehung zwischen Phänomen und Teilchenmodell eingeführt wird - bei der Einführung einer Stoffphänomenklärung durch ein wissenschaftliches Teilchenmodell notwendigerweise ein komplexer Zielbereich (die Repräsentation des Phänomens)

mit einem mehr oder weniger unähnlichen komplexen Quellbereich durch den kognitiven Mechanismus der Analogiebildung verknüpft wird. Die beschriebenen notwendigen Schwierigkeiten bei dieser Verknüpfung der Bereiche wären demnach eine mögliche Erklärung für die Schwierigkeiten beim initialen Erwerb des Teilchenmodells. Wie oben erwähnt, wird dabei die Zuordnung des Teilchenmodells zu einem Phänomen als Anwendung der Analogiebildung verstanden (Gentner, 1983)

8.5 Beziehung zwischen Analogiebildung und Erklärungsfindung

Eine weitere grundlegende Annahme für das Verhältnis zwischen Analogielernen und Erklärungsfindung betrifft das Verhältnis der Wissensrepräsentation in ACME und ECHO sowie die Konsequenzen für Lern- und Erklärungsprozesse: Während in ACME eine relativ detaillierte Repräsentation der Propositionen und Objekte vorgegeben ist (Propositionen werden aus Prädikaten und ihren Argumenten aufgebaut, es wird zwischen Objekten und ihren Bezeichnungen unterschieden, Propositionen können auch höherer Ordnung sein, d.h. sie haben wiederum Propositionen als Argumente), werden in ECHO Propositionen als Ganzes aufgelistet, ihre Inhalte stellen Kommentare dar. Hemmende oder aktivierende Beziehungen zwischen den Propositionen werden in ECHO separat beschrieben.

Da die Studie die Rolle der Analogiebildung für die Erklärung von naturwissenschaftlichen Beobachtungen untersucht, soll die Simulation letztlich zeigen, inwieweit neu gebildete Analogien neue Erklärungen ermöglichen. Für das Finden neuer Erklärungen entscheidend sind in ECHO neue Beziehungen zwischen den Propositionen (Erklärungsbeziehungen, Erklärungsanalogien, Widersprüche, etc.), die getrennt von den Propositionen beschrieben werden. Für das Finden einer neuen Erklärung einer experimentellen Beobachtung spielen damit durch ACME gebildete Analogien zwischen Propositionspaaren die entscheidende Rolle. Denn nur neu gebildete Analogien dieses Typs (von Beziehungen zwischen ganzen Propositionen) können von ECHO im Prozess der Erklärungsfindung benutzt werden, weil sich durch solche (und andere) Beziehungen verknüpfte Propositionen gegenseitig in ihrer Aktivierung verstärken und damit eine neue Kette aktivierter Propositionen bilden können. Falls es sich beispielsweise bei dem neu erworbenen Wissen um Analogien zwischen Modellrelationen handelt, können Propositionen eines neu zu erklärenden Phänomens über die Analogie der Modellbeziehungen mit einer schon vorhandenen kompletten Teilchenerklärung verknüpft werden.

Während ECHO die Analogien, die nach dem Lesen der Geschichte bei der Erklärung der Prätestaufgabe gebildet werden, ohne neue Voraussetzungen nutzen kann, müssen zur „richtigen“ Lösung der Erklärungsaufgabe im Posttest Annahmen über das Lernergebnis gemacht werden: Zumindest nach erfolgreicher Konstruktion muss angenommen werden, dass Modellrelationen erworben werden (siehe unten bei der Beschreibung der Simulationen zur Erklärung der Brownschen Bewegung). Damit kann ECHO eine Erklärungskette aktivierter Propositionen bilden, die von der Modellbeziehung der beteiligten Stoffe über die Modellerklärung bis hin zur Modellbeziehung des Erklärungsziels reicht. Die noch konkurrierende Erklärung aus der Geschichte sollte in den Hintergrund gedrängt werden, weil die Erklärungskette der Teilchenmodellerklärung besser mit den als evident angenommenen Phänomenen (Experimenten) verknüpft ist.

8.6 Vorgehen beim Erstellen der Simulationen

Um die Abfolge von Lern- und Problemlöseschritten beim Lernen aus Geschichten und Arbeiten mit der Simulation und dem sich jeweils anschließenden Bearbeiten der Prä- bzw. Posttestaufgaben zu erfassen, wurde folgendes Vorgehen gewählt.

8.6.1 Gliederung in 4 Simulationstypen nach Testaufgaben und in zweiter Linie nach gelesenen Geschichten.

Zunächst werden die Simulationen nach den beiden Aufgabengruppen (eine Aufgabengruppe zur Diffusion mit identischen Aufgaben in Prä- und Posttest und einer analogen Simulationsaufgabe mit annähernd identischer Tiefenstruktur, eine entsprechende Aufgabengruppe zur Brownschen Bewegung) getrennt voneinander modelliert. Da zwischen den beiden Gruppen, die unterschiedliche Geschichten lasen, in der empirischen Untersuchung nur wenige Unterschiede gefunden wurden, werden die gelesenen Geschichten nur in zweiter Reihe, also den Aufgaben untergeordnet, berücksichtigt.

8.6.2 Zeitliche Gliederung der Lern- und Testphasen jeder Simulation

Danach wird die Untersuchung in zwei Lern- und zwei Testphasen unterteilt.

- Die erste Lernphase besteht aus dem Lesen der Geschichte und dem Lesen der Testaufgabe. Da vor und nach dem Lesen der Testaufgabe in der Versuchsinstruktion darauf hingewiesen wurde, beim Lösen an die gelesene Geschichte zu denken, wird angenommen, dass die Probanden Analogiebeziehungen zwischen Geschichte und Testaufgabe aufgebaut haben. Besonderes Augenmerk wird in der Simulation dieser ersten Lernphase auf den Aufbau von Analogien zwischen Erklärungen gelegt, weil Erklärungen (d.h. Propositionen höherer Ordnung zwischen Ursache-Wirkungs-Prädikaten, die als Argumente andere Prädikate besitzen) von der Geschichte auf das Experiment übertragen werden müssen, um das Experiment analog der Geschichte erklären zu können. Mit dem Modell ACME wird der Aufbau dieser Analogiebeziehungen simuliert, als Ergebnis liegen die Aktivierungsstärken der entsprechenden Analogie-Units im konnektionistischen Netzwerk vor.
- Die erste Problemlösephase besteht darin, eine Lösung für die Prätestaufgabe zu ermitteln, wobei aus der ersten Lernphase die Analogiebeziehungen zwischen Erklärungen als neu erworbenes Wissen benutzt werden können, um das Experiment mit der Geschichte verbinden. Als Ergebnis liegen die Aktivierungen der Propositionen vor, die sich im konnektionistischen Netzwerk der Propositionen und der Beziehungen zwischen ihnen als besonders aktiv erweisen (siehe auch die Erläuterungen zu ECHO). Aus der Liste der Aktivierungen der Propositionen lässt sich ablesen, welche Propositionen bei der Lösung der Aufgabe eine aktive Rolle spielen.
- Die zweite Lernphase der Simulation besteht darin, Analogiebeziehungen zwischen den von der Versuchsperson selbst erzeugten Erklärungen des Lernphasenexperiments und den Testaufgaben zu finden. Dazu wird wieder ACME unter Berücksichtigung von Erklärungsbeziehungen benutzt. Als Ergebnis liegen wiederum die Stärken der Analogiebeziehungen vor.
- Die zweite Problemlösephase besteht darin, unter Berücksichtigung der Analogiebeziehungen aus den beiden Lernphasen eine Erklärung des Testexperiments zu finden, d.h. eine Liste der Aktivierungen der Propositionen zu errechnen, die unter diesen neuen Umständen zur Aufgabenlösung benutzt werden.

8.6.3 Umsetzung des Lern- und Testmaterials der Untersuchung in der Simulation

Im nächsten Schritt werden die beiden Geschichten, Aufbau und Beobachtungen der Experimente sowie der Aufbau der Simulation für die Läufe von ACME und ECHO nach der obigen Reihenfolge in Propositionen gefasst. Für die dritte Phase der Simulation, den ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen Testexperiment und Erklärung des Lernphasenexperiments, werden nur die Versuchspersonen berücksichtigt, die das Lernphasenexperiment mit ihrer Teilchenmodellkonstruktion „richtig“ erklären konnten. Diese Vorgehensweise wird gewählt, um den Aufwand der Simulation nicht

noch weiter zu erhöhen: Nach dem „erfolglosen“ Konstruktionsversuch einer Teilchenerklärung in der Lernphase fanden nur 2 Versuchspersonen eine „richtige“ Erklärung des Testexperiments, während alle anderen Versuchspersonen nach einem erfolglosen Konstruktionsversuch auch in der Testphase „erfolglos“ blieben. Andererseits teilte sich die Gruppe der Versuchspersonen mit einer „richtigen“ Konstruktion in der Lernphase in zwei größere Untergruppen mit „richtiger“ und solche mit „falscher“ Erklärung in der Posttestphase. Zur kognitiven Erklärung dieses empirischen Ergebnisses sollte die Simulation einen Hinweis geben.

Bei der Umsetzung in die propositionale Darstellung existieren viele Freiheitsgrade, insbesondere wenn nicht nur Texte, sondern auch visuelle Konstruktionen des Teilchenmodells und bildliche Darstellungen der Test- und Lernphasenexperimente in Propositionen umgesetzt werden. Schon die Umsetzung eines Texts in Propositionen, für die es unterschiedliche Verfahren gibt (siehe z.B. Ballstaedt, 1997) kann in sehr unterschiedliche Ergebnisse münden, da bei Umsetzung große Spielräume bestehen. Zum Beispiel können die einzelnen Satzteile mehr oder weniger weitgehend in Grundbedeutungen zerlegt oder eher als komplexe Propositionsbestandteile belassen werden. Weiter gibt es Spielräume bei der Anzahl der Argumente, die einem Prädikat zugeordnet werden können. Diese Freiheitsgrade werden in der Simulation zusammen mit der Vernachlässigung randständiger Details genutzt, um ein von Oberflächendetails befreites propositionales Modell des Texts, der Aufgaben bzw. Konstruktion zu formulieren, das die Auffindung von Analogien erleichtert. Zum Beispiel werden Propositionen in Ziel- und Quellbereich, die als Kandidaten für Analogien gelten, mit der gleichen Anzahl von Argumenten formuliert, weil sie ansonsten wegen struktureller Unähnlichkeit von ACME nicht für den Analogiebildungsprozess berücksichtigt werden. Psychologisch erscheint dieses freie Vorgehen plausibel, da die bekanntesten Theorien zum Textverstehen zunächst Verarbeitungsschritte vom Oberflächenmodell des Textes hin zu einem propositionalen mentalen Bedeutungsmodell eines Textes formulieren. Solche Bedeutungsmodelle werden durch Strukturvergleiche auch in anderen Zusammenhängen (etwa bei der Bildverarbeitung, s. Schnotz & Bannert, 2003) miteinander verknüpft.

8.6.4 Durchführung der Simulationsläufe

Im letzten Schritt werden auf der Basis der Propositionalisierung die Anweisungen für die Simulationsprogramme ACME und ECHO erstellt und die Simulationsläufe durchgeführt. Die errechneten Simulationsergebnisse (mit den Anweisungsdateien für die einzelnen Simulationsläufe sind im Anhang aufgeführt).

8.7 Durchführung und Ergebnisse der Modellierung

8.7.1 Aufgabe zur Brownschen Bewegung

8.7.1.1 Lösen der Aufgabe zur Brownschen Bewegung nach dem Lesen der Ballgeschichte

Die Simulation des Erklärungs- und Lernverhaltens beim Experiment zur Brownschen Bewegung wird hier an erster Stelle behandelt, da sie einen charakteristischen Lern- und Erklärungsverlauf erfassen soll: Während im Prätest von keiner Versuchsperson nach dem Lesen der Geschichten eine „richtige“ Lösung gefunden wurde, konstruierte in der Lernphase ein erheblicher Teil ein „richtiges“ Modell. Im Posttest fand ebenfalls ein deutlicher Anteil der Gruppe eine „richtige“ Lösung. In diesem Verhalten unterscheidet sich also die Gruppe mit der Ballspielgeschichte kaum von der Gruppe mit der Fischgeschichte, diese Besonderheit ist demnach wahrscheinlich durch Eigenheiten der Lern- und Testaufgabe im Kontext dieser Untersuchung verursacht.

In der Simulation werden die Vorüberlegungen zur Analogiebildung und zur Erklärungsfindung ausgearbeitet und angewendet. Nimmt man wie oben das Lernen durch Analogien als zentralen Lernmechanismus an, so drängt sich als Vermutung auf, dass die Geschichte als Quellbereich der

Analogiebildung zur Prätestaufgabe nicht zu solchen Analogiebildungen führt, die eine „richtige“ Lösung ermöglichen. Das Lernproblem der Versuchspersonen liegt nach dieser Sichtweise darin, dass zwar das Zittern der Tuscheteilchen im Experiment den Richtungsveränderungen der Bewegung der Bälle in der Geschichte zugeordnet werden kann, dies aber nicht für das Wasser gilt, dessen Verhalten unter dem Mikroskop nicht sichtbar und damit dem Verhalten der Bälle nicht ähnlich ist. Deshalb wird das Wasser (bzw. sein Verhalten) nicht mit den Bällen (bzw. ihrem Verhalten) in analoge Beziehung gebracht, weswegen wiederum in der Folge die Ursache-Wirkungs-Erklärung der Geschichte (dass nämlich die andauernden Kollisionen der Bälle die andauernde Richtungsänderung ihrer Bewegung verursacht) nicht auf die Tuscheteilchen übertragen werden kann. Auch der Zusammenstoß der Tuscheteilchen kann nicht mit den Zusammenstößen der Bälle verbunden werden, denn die Tuscheteilchen stoßen unter dem Mikroskop nicht zusammen, sondern verharren voneinander entfernt in zitternder Bewegung. Damit kann ein entscheidender Bestandteil der Teilchenerklärung des Zitterns der Tuscheteilchen nicht seine Funktion in der Erklärungskette einnehmen, die Teilchenerklärung des Experiments ist kaum noch möglich.

Im Gegensatz dazu ist beim Diffusionsexperiment das unterschiedliche Verhalten beider Farbstoffe klar erkennbar. Deswegen kann das Verhalten der Farbstoffe bzw. diese selbst als Objekte analog dem verschiedenen Verhalten der kleinen und großen Bälle bzw. ihnen selbst als Objekten zugeordnet werden. Hier ist deshalb eine Analogieerklärung des Experiments möglich. Bei der Brownschen Bewegung kann wie oben erklärt keine komplette Erklärungsanalogie gebildet werden.

Im Folgenden wird die Formulierung dieser Hypothesen in den einzelnen Schritten der Simulation ausführlich mit Eingabedateien und Ergebnisausdrucken nachvollzogen, die anderen Simulationen werden danach kürzer mit Verweis auf die Eingabefiles und Ergebnisausdrücke im Anhang behandelt.

Modellierung der Analogiebildung zwischen dem Experiment des Prätests und der Ballgeschichte mit dem ACME-Modell

Im ersten Schritt wird die Analogiebildung modelliert, die nach dem Lesen der Geschichte und der Prätestaufgabe zur Brownschen Bewegung angenommen wird (der Versuchsleiter gab einen Hinweis, beim Lösen der Testaufgaben an die gelesene Geschichte zu denken). Die Geschichte wird zunächst in der unten aufgeführten Kommandodatei in Propositionen für den Simulationslauf nach folgender Syntax formalisiert:

(Prädikat (Argument1 Argument2 Argument3...) Propositionsname).

Dazu kommen einige Eingaben, die „default“-Einstellungen für die verschiedenen Parameter des ACME-Laufs regeln, Bezeichnungen und Abgrenzungen des Quell- und des Zielbereichs angeben, sowie (am Schluss der Datei) die Bildung des konnektionistischen Netzwerks der Analogiehypothesen und dessen Start initiieren.

```
(defaults 'acme)
(defun make_struct1 ()
(make_struct 'makroskopisches_ball_modell
'sentence
'(all
(
(klasse(obj_klasse) obj_ballspiel_1)
(ballspiel (obj_ballspiel) obj_ballspiel_2)
(baelle (obj_baelle) obj_ballspiel_3)
(grosse_baelle (obj_grosse_baelle) obj_ballspiel_4)
(kleine_baelle (obj_kleine_baelle) obj_ballspiel_5)
(gruppe_1 (obj_gruppe_1) obj_ballspiel_6)
(gruppe_2 (obj_gruppe_2) obj_ballspiel_7)
(haelfte_1 (obj_haelfte_1) obj_ballspiel_8)
(netz (obj_netz) obj_ballspiel_9)
(boden (obj_boden) obj_ballspiel_10)
```

```

(decke (obj_decke) obj_ballspiel_11)
(linke_wand (obj_linke_wand) obj_ballspiel_12)
(rechte_wand (obj_rechte_wand) obj_ballspiel_13)
(groessere_maschen (obj_groessere_maschen) obj_ballspiel_14)
(kleinere_maschen (obj_kleinere_maschen) obj_ballspiel_15)
(sportlehrerin (obj_sportlehrerin) obj_ballspiel_16)
(halle (obj_halle) obj_ballspiel_17)
enthaltet (obj_ballspiel obj_groesse_baelle obj_kleine_baelle) ballspiel_1)
(geteilt (klasse obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_2)
(sich_befinden (obj_haelfte1 obj_gruppe1) ballspiel_3)
(sich_befinden (obj_haelfte2 obj_gruppe2) ballspiel_4)
(haben_gleiche_anzahl (obj_baelle obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_5)
(gespannt (obj_netz obj_halle) ballspiel_6)
(reicht (obj_netz obj_boden obj_decke obj_linke_wand obj_rechte_wand) ballspiel_7)
(enthaltet (obj_netz obj_groessere_maschen obj_kleinere_maschen) ballspiel_8)
(starten (obj_sportlehrerin ballspiel_10) ballspiel_9)
(faengt_an (obj_gruppe obj_ballspiel) ballspiel_10)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_1 obj_baelle obj_netz) ballspiel_11)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_2 obj_baelle obj_netz) ballspiel_12)
(hat_aufgabe (obj_gruppe1 ballspiel_13) ballspiel_13)
(hat_aufgabe (obj_gruppe2 ballspiel_14) ballspiel_14)
(treffen_sich (obj_baelle) ballspiel_15)
(fliegen_kreuz_und_quer (obj_baelle) ballspiel_16)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_15 ballspiel_16) ballspiel_17)
(hindurch_passen (obj_kleine_baelle obj_kleinere_maschen) ballspiel_18)
(durchqueren (obj_kleine_baelle obj_netz) ballspiel_19)
(nicht_hindurch_passen (obj_grosse_baelle obj_groessere_maschen) ballspiel_20)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_21)
(abprallen (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_22)
(zurueck_fliegen_aus (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_23)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_17 ballspiel_18) ballspiel_24)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_20 ballspiel_21) ballspiel_25)
(beendet_spiel (obj_sportlehrerin obj_ballspiel) ballspiel_26)
(zaehlen (obj_alle_personen obj_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ballspiel_27)
(entscheiden (obj_alle_personen obj_mehr_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ball-
spiel_28)
) ) ) )

(defun make_struc2 ()
(make_struc 'brownsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
( (objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_broecken obj_tusche) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)

```

))))

```
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung")
  (similar 'fliegen_kreuz_und_quer 'zittern.2)
  (similar 'baelle 'tinten_broeckchen.2)
  (similar 'bestehen_aus 'geteilt.2)
  (constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'makroskopisches_ball_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme) )
(acme)
```

ACME wiederholt mit diesen Programmeingaben so lange seine Programmschleife, bis alle Analogie-Units ihre Aktivitäten nur noch unterhalb einer Abbruchsschwelle ändern. Im Ergebnisausdruck werden den allgemeinen Kenngrößen des Simulationslaufs die stärksten analogen Mappings für die Einheiten des Zielbereichs der Analogie mit ihren Aktivierungswerten ausgedruckt. Der Simulationslauf von ACME mit der obigen Kommandodatei erbrachte folgendes Ergebnis:

```
Network has settled by cycle 96.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 97
makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 3.1585796
Calculating the best mappings after 97 cycles.
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.89271116
Best mapping of ZITTERN is FLIEGEN_KREUZ_UND_QUER. 0.7544706
Best mapping of EINSETZEN is NICHT_HINDURCH_PASSEN. 0.57498986
Best mapping of TUPFEN is FAENGT_AN. 0.68653476
Best mapping of MISCHEN is GETEILT. 0.627181
Best mapping of BESTEHEN_AUS is SICH_BEFINDEN. 0.7156795
Best mapping of MIKROSKOP is GROESSERE_MASCHEN. 0.54888827
Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is BAELE. 0.54925746
Best mapping of WASSER is HALLE. -1.5761642E-6
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with KLEINERE_MASCHEN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
tied with NETZ.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with KLEINE_BAELE.
tied with GROSSE_BAELE.
Best mapping of TUSCHE is HALLE. -1.5761642E-6
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with KLEINERE_MASCHEN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
```

tied with NETZ.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with KLEINE_BAELE.
tied with GROSSE_BAELE.
Best mapping of OBJEKTRAEGER is BALLSPIEL. 0.5436554
Best mapping of BROWN_7 is BALLSPIEL_25. 0.40412778
Mapping with BALLSPIEL_17 is also possible: 0.33340377
Mapping with BALLSPIEL_24 is also possible: 0.25892735
Best mapping of BROWN_5 is BALLSPIEL_3. 0.68354887
Best mapping of BROWN_1 is BALLSPIEL_4. 0.4115118
Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_BALLSPIEL_14. 0.54888827
Best mapping of OBJ_BROWN_4 is OBJ_BALLSPIEL_3. 0.54925746
Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_BALLSPIEL_17. -1.5761642E-6
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_15.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_9.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_5.
tied with OBJ_BALLSPIEL_4.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_BALLSPIEL_17. -1.5761642E-6
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_15.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_9.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_5.
tied with OBJ_BALLSPIEL_4.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_BALLSPIEL_2. 0.5436554
Best mapping of BROWN_2 is BALLSPIEL_9. 0.79562426
Mapping with BALLSPIEL_2 is also possible: 0.23880468
Best mapping of BROWN_3 is BALLSPIEL_10. 0.90165454
Best mapping of BROWN_4 is BALLSPIEL_20. 0.57360303
Mapping with BALLSPIEL_15 is also possible: 0.37053847
Best mapping of BROWN_6 is BALLSPIEL_16. 0.5264917
Mapping with BALLSPIEL_18 is also possible: 0.20664166
Mapping with BALLSPIEL_21 is also possible: 0.34475887
Best mapping of OBJ_BROECKEN is OBJ_HAELFTE1. 0.68354887
Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_GRUPPE. 0.68653476
Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_GRUPPE2. 0.76083255
Best mapping of OBJ_MIKROSKOP is OBJ_GROESSERE_MASCHEN. 0.69560593
Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_BAELE. 0.6970288
Best mapping of OBJ_WASSER is KLASSE. 0.7034408
Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_GRUPPE1. 0.8318791

Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_BALLSPIEL. 0.67384595

Wenn die Propositionen der Eingabedatei mit der Liste der stärksten analogen Verknüpfungen (= der am stärksten aktivierten Analogie-Units für jede Proposition des Zielbereichs) verglichen werden, wird deutlich, dass ACME den Tuschebrockchen die Bälle zuordnet, aber für das Wasser des Experiments wie erwartet keine Zuordnung (mit einer über Null liegenden Aktivierung) finden kann. Die Ursache-Wirkungs-Proposition des Experiments wird zwar der entsprechenden Proposition der Geschichte zugeordnet (dabei spielen der gleiche Prädikatsname und die gleiche Argumentzahl eine Rolle), allerdings treten bei Zuordnung der Proposition, die hier als Argumente fungieren, schon deswegen Unregelmäßigkeiten auf, weil die Ursache-Wirkungs-Proposition des Experiments das Zittern der Tuschebrockchen einfach auf den Aufbau des Experiments zurückführt, während die Ursache-Wirkungs-Relation der Geschichte den Zusammenprall der Bälle als Ursache ihres Hin-und-Her-Fliegens beschreibt:

Die Verursachungs-Proposition im Experiment lautet:

```
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)
```

Dabei lauten die verursachenden Relation brown_2, brown_3 und brown_4:

```
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
```

```
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
```

```
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
```

Die Wirkung der Proposition lautet:

```
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
```

Die Verursachungsrelation in der Geschichte:

```
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_15 ballspiel_16))
```

Die verursachenden Propositionen lauten:

```
(starten (obj_sportlehrerin ballspiel_10) ballspiel_9)
```

```
(faengt_an (obj_gruppe obj_ballspiel) ballspiel_10)
```

```
(treffen_sich (obj_baelle) ballspiel_15)
```

Die Wirkungsproposition lautet:

```
(fliegen_kreuz_und_quer (obj_baelle) ballspiel_16)
```

Die beiden Wirkungspropositionen werden von ACME mit einer Aktivierungsstärke von 0.75 als analog erkannt.

Die jeweils ersten beiden Verursachungspropositionen werden ebenfalls als analog erkannt. Die an dritter Stelle stehenden Propositionen werden nicht eindeutig als analog erkannt, was allerdings für die Erklärungsanalogie ohne Bedeutung ist, weil auch eine Zuordnung keine inhaltlich sinnvolle Analogie ergeben hätte. Weil damit aber die Ballkollision (Proposition ballspiel_15) als notwendige Voraussetzung für die andauernden Richtungsveränderungen nicht mehr in die Erklärungsanalogie eingehen kann, kann ACME keine Erklärungsanalogie bilden, die ungefähr der des Teilchenmodells entspricht. Damit zeigt ACME insofern ein ähnliches Verhalten wie alle Versuchspersonen, als es ebenfalls die Erklärung der Richtungsveränderung der Ballbewegung nicht aus der Geschichte auf das Experiment übertragen hat.

Generell können die beiden Ursache-Wirkungs-Propositionen in Geschichte und Experiment nicht nur in der hier gewählten Art und Weise, sondern auf viele unterschiedliche Arten und Weisen formuliert werden. Als Konsequenz ergeben sich in den ACME-Läufen viele unterschiedliche analoge Zuordnungen der beteiligten Propositionen. Allerdings scheint es unmöglich, eine inhaltlich „richtige“ Ursache-Wirkungs-Analogie zwischen Geschichte und Experiment zu finden, solange die erkennbaren Ursache-Wirkungs-Mechanismen in Geschichte und Experiment ausgeschöpft und nicht auf ein wesentlich weniger aussagekräftiges Mass verallgemeinert werden. Insofern kann als Ergebnis dieses Simulationslaufs festgehalten werden, dass zwischen der Geschichte und der Simulation keine adäquate Ursache-Wirkungs-Analogie zur Erklärung des Verhaltens der Farbstoffe gefunden werden kann.

Das kognitive Modell zur Analogiebildung generiert damit für die Ballspielgeschichte den ersten durch die Simulation zu erklärenden Aspekt der empirischen Daten), dass nämlich der Mechanismus der Richtungsänderung der Bälle überhaupt nicht auf das Testexperiment der Brownschen Bewegung übertragen wird. ACME ordnet dem Wasser keine Bälle der Geschichte zu. Verursacht wird diese fehlende Zuordnung durch die inhaltlich unterschiedlichen kausalen Erklärungen von Zittern der Tuscheteilchen im makroskopischen Experiment und dem Hin-und-Her-Fliegen der Bälle: Während das Zittern im Experiment lediglich

auf den Aufbau des Experiments attribuiert werden kann (eine eher das Experiment und sein Ergebnis beschreibende Erklärung), werden die Richtungsänderungen in der Geschichte mit den Kollisionen erklärt. Dieses Verhalten von ACME (und wahrscheinlich auch das Verhalten der Versuchspersonen) legt nahe, dass Experiment und erklärende Quellanalogie syntaktisch, semantisch und pragmatisch sorgfältig aufeinander abgestimmt werden müssen, damit Schüler und Schülerinnen auch tatsächlich die Objekte und Prädikate einander zuordnen können. Insbesondere muss im Anfangsstadium darauf geachtet werden, dass alle wichtigen Elemente des Experiments und des Quellbereichs deutlich wahrnehmbar sind. Man könnte dieses empirische Ergebnis und seine Erklärung durch ACME auch als Hinweis darauf deuten, dass die Brownsche Bewegung in dieser Form (d.h. mit einem leicht „übersehbaren“ Stoff Wasser) zum initialen Erlernen des Erklärens mit Teilchenmodell nicht geeignet ist.

Modellierung der Erklärung des Prätestexperiments mit dem ECHO-Modell

Als Input in den ECHO-Lauf dienen die Propositionalisierungen der Geschichte und des Experiments ergänzt um die Erklärungsanalogien, die ACME gefunden hat.

```

; FILE: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; PURPOSE: test der explanatory coherence der Diffusionsaufgabe nach Lesen der Ballgeschichte
; PROGRAMMER: Michael Rohr
; CREATED: 23.12.2003
; *****
(defaults 'echo)
; *****
;(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
;(setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
;(clear-net)
;*****
; Geschichte
(proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde fängt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.") ;
(proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Bälle") ;
(proposition 'g1_3 "Die Bälle sind gross oder klein.") ;
(proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.")
(proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Hälfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Hälfte der Sporthalle.")
;
(proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bällen.
") ;
(proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
(proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
(proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
(proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
(proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige grösser und viele kleiner.") ;
(proposition 'g1_13 "Die grösseren Maschen sind gerade so gross wie die grössten Bälle.")
(proposition 'g1_14 "Die grössten Bälle passen nicht durch die grössten Maschen.")
(proposition 'g1_15 "Die kleineren Bälle passen durch die grössten Maschen.")
(proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
(proposition 'g1_17 "Die kleineren Bälle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_18 "Die grösseren Bälle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_19 "Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Baele wie moeglich durch das Netz in die Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
(proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
(proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baele zum Netz.") ;
(proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baele.") ;
(proposition 'g1_23 "Die Baele fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
(proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baele passen durch die Maschen.")
(proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baele passen nirgendwo hindurch.")
(proposition 'g1_26 "Die Kleinen Baele fliegen durch das Netz.")

```

```
(proposition 'g1_27 "Die groesseren Baelle durchqueren das Netz nicht.")
(proposition 'g1_28 "Die kleinen Baelle fliegen fast immer in das Netz.")
(proposition 'g1_29 "Die grossen Baelle werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
(proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;
(proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baelle in die Haelf-
te der anderen befoerdert hat.") ;
;*****
;Diffusionsexperiment
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas werden einige Tropfen Tusche mit etwa 10-mal
soviel Wasser gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.")
;
(proposition 'exp_brown_3 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_4 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit derdurch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_6 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_8 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;
;*****
; Erklarungszusammenhaenge in der Ballspielgeschichte:
; Die Erklarungszusammenhaenge enthalten in beiden Analoga viele Explanans-Aussagen, die je-
weils
; ein Explanandum erklaren. Annahme: Das entspricht eher der Alltagsargumentation. Ansons-
ten entsteht das Problem
; den Aufloesungsgrad der Erklarungsketten festzulegen und in der Folge das Problem, nur noch
Erklaerungsanaloga genau auf
; diesen Erklarungsketten festlegen zu koennen. Damit sind kaum mehr Analoga für die konkre-
ten Datensatze der Linkenheimstudie
; formulierbar.
; 1. Zwei Erklärungen, warum grosse Baelle zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_24) 'g1_26)
(explain '(g1_20 g1_21 g1_25) 'g1_27)
; 2. Erklärung, warum die Baelle kreuz und quer fliegen.
(explain '(g1_15 g1_16 g1_17) 'g1_18)
;*****
; Erklarung im Brownschen Experiment
; Wiederum eine Erklarung, die die Beobachtung auf den experimentellen Aufbau zurueckfuehrt.
; Siehe entsprechendes Verstaendnis kausaler Zusammenhaenge.
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_8)
;*****
; Analogien
; Die Analogie wurde durch den ACME zur Analogiebildung zwischen Experiment und Geschichte be-
stimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_15 exp_brown_1) '(g1_18 exp_brown_8) )
(analogous '(g1_16 exp_brown_2) '(g1_18 exp_brown_8) )
(analogous '(g1_17 exp_brown_3) '(g1_18 exp_brown_8) )
(data '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3 exp_brown_4 exp_brown_5 exp_brown_6 exp_brown_7
exp_brown_8))
(gross_on)
(run_exp)
```

ECHO lieferte folgendes Ergebnis:

Network has settled by cycle 63.
patched print_run

Test: TEST0 Total times: 64
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 0.465576
Total times: 64
EXP_BROWN_1 has activation: 0.727521
EXP_BROWN_2 has activation: 0.7604323
EXP_BROWN_3 has activation: 0.7604323
EXP_BROWN_4 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_5 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_6 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_7 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_8 has activation: 0.795233
G1_1 has activation: 3.752411E-4
G1_10 has activation: 3.752411E-4
G1_11 has activation: 3.752411E-4
G1_12 has activation: 3.752411E-4
G1_13 has activation: 3.752411E-4
G1_14 has activation: 3.752411E-4
G1_15 has activation: 3.752411E-4
G1_16 has activation: 0.5541164
G1_17 has activation: 0.5541164
G1_18 has activation: 0.66761833
G1_19 has activation: 3.752411E-4
G1_2 has activation: 3.752411E-4
G1_20 has activation: 0.04692276
G1_21 has activation: 0.04692276
G1_22 has activation: 3.752411E-4
G1_23 has activation: 3.752411E-4
G1_24 has activation: 0.028202198
G1_25 has activation: 0.028202198
G1_26 has activation: 0.028202198
G1_27 has activation: 0.028202198
G1_28 has activation: 3.752411E-4
G1_29 has activation: 3.752411E-4
G1_3 has activation: 3.752411E-4
G1_30 has activation: 3.752411E-4
G1_31 has activation: 3.752411E-4
l_4 has activation: 3.752411E-4
G1_5 has activation: 3.752411E-4
G1_6 has activation: 3.752411E-4
G1_7 has activation: 3.752411E-4
G1_8 has activation: 3.752411E-4
G1_9 has activation: 3.752411E-4

Alle Propositionen des Experiments sind deshalb stark aktiviert, weil sie alle als „Daten“, d.h. als evident angegeben sind.

Über die aktivierenden Verbindungen der analogen Erklärungen werden durch die entsprechenden Experimentpropositionen die Propositionen g1_15, g1_16, g1_17 und g1_18 aktiviert, während alle anderen Propositionsunits einen Aktivationswert nahe null erreichen. ECHO zieht also die Erklärung der Geschichte für den Richtungswechsel der Bälle zur Erklärung des Experiments heran. Diese Erklärungsanalogie ist von ACME wie oben beschrieben gefunden worden und inhaltlich „falsch“. Die Kombination von ACME und ECHO kann damit ebenso wie die Versuchspersonen keine „richtige“ Erklärung der Brownschen Bewegung von Tuschepartikeln erzeugen.

Dieses Ergebnis erklärt die eine Hälfte des zu erklärenden zweiten Aspekts der empirischen Daten, dass nämlich im Prätest bei der Brownschen Bewegung keine „richtigen“ Aufgabenlösungen erreicht wurden.

Modellierung der Analogiebildung zwischen dem Experiment des Posttests und der Konstruktion einer „richtigen“ Erklärung des Experiments der Lernphase durch ein Teilchenmodell Im nächsten Schritt nach dem Arbeiten mit der Modellierungsumgebung soll ACME vor dem Posttest Analogien finden zwischen der „richtigen“ kompletten Lösung der Lernaufgabe (die wie erwähnt das Experiment mit der Brownschen Bewegung von Rauchpartikeln in Luft sowie die entsprechende Erklärung durch eine selbst konstruierte Teilchenszene enthält) und dem Posttestexperiment (identisch mit dem Prätestexperiment). Hier gehen in die Eingabedatei für ACME entsprechend Test- und Lernexperiment ein. Im Unterschied zum ACME-Lauf vor dem Lösen des Prätests werden für die beiden Experimente die grundlegenden Modellbeziehungen zwischen Stoffen und ihrer Teilchendarstellung explizit angegeben, weil eine grundlegende Information über diese Modellbeziehung ausdrücklich und allgemein gültig vom Versuchsleiter in der Lernphase gegeben worden war.

Neben den Modellbeziehungen für die Stoffe wird die Modellbeziehung für das Erklärungsziel des Lernphasenexperiments explizit formuliert, dass nämlich das Zittern der Tuscheteilchen dem Zittern der großen Kugeln entspricht. Diese Modellbeziehung wird vom nachfolgenden ECHO-Lauf benötigt, um das Erklärungsziel mit der Teilchenerklärung (der von der Versuchsperson selbst konstruierten Teilchensimulation des Versuchs) zu verknüpfen. Als empirischer Hinweis auf ihre Berechtigung für das Lernphasenexperiment kann gelten, dass alle Versuchspersonen ihre Teilchenkonstruktion nach deren abschließendem Lauf noch einmal ausführlich erklären sollten und dass der Hinweis auf der Beziehung von „Zittern“ der Kugeln zum Zittern der Rauchteilchen bei einer „richtigen“ Konstruktion in allen Fällen zumindest implizit Bestandteil der Erläuterungen war.

Allerdings muss diese Modellrelation auch für das Testexperiment formuliert werden, da sonst die entsprechende Analogie zwischen Lernphasenexperiment und Testexperiment nicht gebildet und somit später auch nicht von ECHO zur Verknüpfung des Testexperiments mit der Teilchenerklärung verwendet werden kann. Diese für eine „richtige“ Erklärung (innerhalb des gebrauchten Simulationsmodells) des Testexperiments notwendige Annahme kann aus den empirischen Daten kaum begründet werden, es kann lediglich vermutet werden, dass die Existenz dieser Modellrelation von den Versuchspersonen auch für das Textexperiment angenommen wird, falls sie bei einer „richtigen“ Teilchenmodellkonstruktion während der Lernphase einmal für das analoge Lernphasenexperiment gebildet worden ist. Somit handelt es sich eher um eine der vielen „ungedeckten“ Annahmen kognitiver Modelle, die für ihre Lauffähigkeit als Computersimulation gemacht werden müssen. Diese Unterdeterminierung kognitiver Modelle durch empirische Daten ist ein bekanntes Phänomen, das für die meisten Computermodelle kognitiver Prozesse gilt (Opwis & Spada, 1994; Wallach, 1998).

```

;datei: acme-brown-ball-simulation.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
;problem 1: Simulation
(defun make_struc1 ()
(make_struc 'erfolgreiches_simulations_modell
'sentence
'(all
(
; Objekte des makroskopischen Versuchs der Brownschen Bewegung von Zigarettenrauchpartikeln
(rauchkammer (obj_rauchkammer) obj_brown_sim_1)
(zigarettenrauch (obj_zigarettenrauch) obj_brown_sim_2)
(luft (obj_luft) obj_brown_sim_3)
(zigarettenrauch_broeckchen (obj_zigarettenrauch_broeckchen) obj_brown_sim_4)
; Objekte der Simulation
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_brown_sim_5)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_brown_sim_6)
(simulationsfeld (obj_simulationsfeld) obj_brown_sim_7)
(simulation (obj_simulation) obj_brown_sim_8)
(teilchen (obj_teilchen) obj_brown_sim_9)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind

```

```

(stoff (obj_stoff) obj_brown_sim_10)
; Propositionen für das Experiment
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) rauch_brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) rauch_brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) rauch_brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) rauch_brown_4)
(bestehen_aus (obj_broeckchen obj_tusche) rauch_brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) rauch_brown_6)
(verursachen (rauch_brown_2 rauch_brown_3 rauch_brown_4 rauch_brown_6) rauch_brown_7)

; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind und direkte Im-
plikationen
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) brown_sim_1)
(ist_ein (obj_zigarettenrauch obj_stoff) brown_sim_2)
(ist_ein (obj_luft obj_stoff) brown_sim_3)
(dargestellt_als (rauch_brown_6 brown_sim_12) brown_sim_3a)
; Propositionen der Erklärung durch die Simulation
(stattfinden (obj_simulation obj_simulationsfeld) brown_sim_4)
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_5)
(dargestellt_als (obj_zigarettenrauch_broeckchen obj_grosse_teilchen) brown_sim_6)
(dargestellt_als (obj_luft obj_kleine_teilchen) brown_sim_8)
(starten (obj_selbst obj_simulation) brown_sim_9)
(bewegen_sich (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_10)
(kollidieren (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_11)
(aendern_bewegungsrichtung (obj_grosse_teilchen) brown_sim_12)
(zittern (obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_13)
(beenden (obj_selbst obj_brown_simulation) brown_sim_15)
(verursachen (brown_sim_5 brown_sim_6) brown_sim_16)
(verursachen (brown_sim_6 brown_sim_7) brown_sim_17)
(verursachen (brown_sim_7 brown_sim_8) brown_sim_18)
) ) )

(defun make_struc2 ()
(make_struc 'brownsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
(
(objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_brown_6)
(teilchen (obj_teilchen) obj_brown_modell_1)
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_brown_modell_2)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_brown_modell_3)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters nach dem Arbeiten mit der Mo-
dellierungsumgebung übertragen worden sind
; Ohne diese einfachen Übertragungen bzw. ohne dass die SchülerIn bemerkt, dass die Aussagen
auch für die Testaufgabe gelten,

```

```

; kann ACME keine Analogien zwischen den beiden Fällen feststellen und damit letztlich ECHO
die analoge Problemlösung auch nicht nutzen.
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) brown_modell_1)
(ist_ein (obj_tusche obj_stoff) brown_modell_2)
(ist_ein (obj_wasser obj_stoff) brown_modell_3)
(dargestellt_als (obj_tusche_broeckchen obj_grosse_teilchen) brown_modell_4)
(dargestellt_als (obj_wasser obj_kleine_teilchen) brown_modell_5)
(zittern (obj_grosse_teilchen) brown_modell_6)
(dargestellt_als (brown_6 brown_modell_6) brown_modell_7)
) ) ) )

(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung")
  (similar 'aendern_bewegungsrichtung 'zittern.9)
  (constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'erfolgreiches_simulations_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)

```

Im Folgenden ist der Ergebnisausdruck von ACME für diesen Lauf aufgeführt.

```

Network has settled by cycle 63.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 64
makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 7.799699
Calculating the best mappings after 64 cycles.
Best mapping of IST_EIN is IST_EIN. 0.87591064
Best mapping of DARGESTELLT_ALS is DARGESTELLT_ALS. 0.90378344
Best mapping of KLEINE_TEILCHEN is KLEINE_TEILCHEN. 0.6951015
Best mapping of GROSSE_TEILCHEN is GROSSE_TEILCHEN. 0.7011317
Best mapping of TEILCHEN is TEILCHEN. 0.69577986
Best mapping of STOFF is STOFF. 0.7073899
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.8307264
Best mapping of ZITTERN is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. 0.8417634
Best mapping of EINSETZEN is EINSETZEN. 0.7631476
Best mapping of TUPFEN is TUPFEN. 0.7631476
Best mapping of MISCHEN is MISCHEN. 0.72673744
Best mapping of BESTEHEN_AUS is BESTEHEN_AUS. 0.89457434
Best mapping of MIKROSKOP is SIMULATION. -4.226994E-5
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with RAUCHKAMMER.
Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.5955574
Best mapping of WASSER is LUFT. 0.5655719
Best mapping of TUSCHE is ZIGARETTENRAUCH. 0.5891523
Best mapping of OBJEKTTRAEGER is SIMULATION. -4.226994E-5
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with RAUCHKAMMER.
Best mapping of BROWN_MODELL_7 is BROWN_SIM_3A. 0.7123003
Best mapping of BROWN_MODELL_5 is BROWN_SIM_8. 0.702899
Best mapping of BROWN_MODELL_4 is BROWN_SIM_6. 0.71918994
Best mapping of BROWN_MODELL_3 is BROWN_SIM_3. 0.71075803
Best mapping of BROWN_MODELL_2 is BROWN_SIM_2. 0.71942896

```

Best mapping of BROWN_MODELL_1 is BROWN_SIM_1. 0.714252
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_3 is OBJ_BROWN_SIM_6. 0.58960843
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_2 is OBJ_BROWN_SIM_5. 0.5999784
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_1 is OBJ_BROWN_SIM_9. 0.5907787
Best mapping of OBJ_BROWN_6 is OBJ_BROWN_SIM_10. 0.6106593
Best mapping of BROWN_7 is RAUCH_BROWN_7. 0.80160236
Best mapping of BROWN_5 is BROWN_SIM_5. 0.30080003
tied with RAUCH_BROWN_1.
Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.30080003
Best mapping of BROWN_1 is BROWN_SIM_5. 0.30080003
tied with RAUCH_BROWN_1.
Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.30080003
Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_BROWN_SIM_8. -4.809222E-5
tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_4 is OBJ_BROWN_SIM_4. 0.595554
Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_BROWN_SIM_3. 0.5655719
Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_BROWN_SIM_2. 0.5891523
Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_BROWN_SIM_8. -4.809222E-5
tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
Best mapping of BROWN_MODELL_6 is BROWN_SIM_12. 0.79807204
Best mapping of OBJ_KLEINE_TEILCHEN is OBJ_KLEINE_TEILCHEN. 0.77748024
Best mapping of OBJ_GROSSE_TEILCHEN is OBJ_GROSSE_TEILCHEN. 0.8371903
Best mapping of OBJ_TEILCHEN is OBJ_TEILCHEN. 0.7840501
Best mapping of OBJ_STOFF is OBJ_STOFF. 0.9024016
Best mapping of BROWN_2 is RAUCH_BROWN_2. 0.84573203
Best mapping of BROWN_3 is RAUCH_BROWN_3. 0.85761917
Best mapping of BROWN_4 is RAUCH_BROWN_4. 0.85761917
Best mapping of BROWN_6 is RAUCH_BROWN_6. 0.8631481
Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_MISCHUNG. 0.7018235
Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_GLAS. 0.64313126
Best mapping of OBJ_MIKROSKOP is OBJ_MIKROSKOP. 0.7018235
Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.91472703
Best mapping of OBJ_WASSER is OBJ_LUFT. 0.7669981
Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_ZIGARETTENRAUCH. 0.8806156
Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_OBJEKTTRAEGER. 0.81462914

Der Vergleich des Ausdrucks dieses Simulationslaufs mit den Propositionen der Eingabedatei zeigt, dass ACME folgende „richtige“ Analogien zwischen dem Posttestexperiment auf der einen Seite und dem Experiment der Lernphase und der dazugehörigen „richtigen“ Teilchenerklärung der Konstruktionsphase gebildet hat:

- Analogien zwischen den Modellbeziehungen (Teilchendarstellung der Stoffe und Modellbeziehung des Erklärungsziels, des Zitterns der Tuscheteilchen),
- Analogie zwischen den Erklärungen auf der makroskopischen Ebene.

Für die Brownsche Bewegung wird damit der dritte Aspekt der zu erklärenden empirischen Ergebnisse erklärt: ACME bildet mit der richtigen Erklärung des Lernphasenexperiments als Quellbereich und dem Testexperiment als Zielbereich zusätzliche analoge „richtige“ Beziehungen zwischen der erfolgreichen Konstruktion des Teilchenmodells und dem Testexperiment.

ACME hat damit die Analogien erkannt, die gemäß den Vorüberlegungen für eine Erklärung der Testaufgabe mit dem Teilchenmodell mit dem ECHO-Modell nötig sind. Es existieren nach den beiden ACME-Läufen Analogien zwischen der Geschichte und dem Prä-/Posttestexperiment, zwischen den Modellbeziehungen der Stoffe und der Modellbeziehung des Erklärungsziels von erklärtem Lernphasenexperiment und Prä-/Posttestexperiment, sowie zwischen den makroskopischen

Erklärungen von Lernphasenexperiment und Testexperiment. Entscheidend für eine „richtige“ Lösung des Textexperiments durch ECHO sollten die Modellbeziehungen für die Stoffe und das Erklärungsziel des Zitterns sein, denn sie erlauben eine Verknüpfung der makroskopischen Beschreibung des Testexperiments mit der Teilchenerklärung eben über diese Modellbeziehungen.

Modellierung der Erklärung des Posttestexperiments mit dem ECHO-Modell unter Verwendung der Analogien aus der Prätest- und der Lernphase

Im abschließenden ECHO-Lauf zur Simulation der Erklärungsfindung des Posttests können die Analogien zwischen den Modellrelationen eingehen, die bei der Analogiebildung erkannt wurden. Es ergibt sich damit folgende Eingabedatei (wiederum sind die Propositionen, die die beiden Experimente beschreiben, als evident („DATA“) eingegeben worden):

```

; datei: echo-brown-ballgeschichte-nach-simulation
; autor: Michael Rohr
; *****
(defaults 'echo)
; *****
;(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
;(setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
;(clear-net)
;*****
; Geschichte
(proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde faengt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.") ;
(proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Baelle") ;
(proposition 'g1_3 "Die Baelle sind gross oder klein.") ;
(proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.");
(proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Haelfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Haelfte der Sporthalle.")
;
(proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bae?llen.
") ;
(proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
(proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
(proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
(proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
(proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige groesser und viele kleiner.") ;
(proposition 'g1_13 "Die groesseren Maschen sind gerade so gross wie die groessten Balle.")
(proposition 'g1_14 "Die groessten Baelle passen nicht durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_15 "Die kleineren Baelle passen durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
(proposition 'g1_17 "Die kleineren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_18 "Die groesseren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_19 "Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Baelle wie moeglich durch das Netz in die Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
(proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
(proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baelle zum Netz.") ;
(proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baelle.") ;
(proposition 'g1_23 "Die Baelle fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
(proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baelle passen durch die Maschen.")
(proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baelle passen nirgendwo hindurch.")
(proposition 'g1_26 "Die kleinen Baelle fliegen durch das Netz.")
(proposition 'g1_27 "Die groesseren Baelle durchqueren das Netz nicht.")
(proposition 'g1_28 "Die kleinen Baelle fliegen fast immer in das Netz.")
(proposition 'g1_29 "Die grossen Baelle werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
(proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;

```

```

(proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baele in die Haelf-
te der anderen befoerdert hat.") ;
;*****
; Experiment zur Brownschen Bewegung von Tusche in Wasser
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas wird etwas Wasser gegeben.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Unter das Wasser werden ein paar Tropfen Tusche gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_3 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.")
;
(proposition 'exp_brown_4 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit der durch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann.") ;
(proposition 'exp_brown_6 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_8 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_9 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;
; Zusätzlicher Teil, der nach einer erfolgreichen Analogiebildung zwischen Test-Experiment und
Simulationsexperiment als neu gelernt angenommen wird.
(proposition 'exp_brown_10 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilche.");
(proposition 'exp_brown_11 "Tusche ist ein Stoff.");
(proposition 'exp_brown_12 "Wasser ist ein Stoff.");
(proposition 'exp_brown_13 "Tuschebröckchen werden als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'exp_brown_14 "Wasser wird als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'exp_brown_15 "Das Zittern der Tuschebröckchen wird als Bewegungsänderung der
Tuschebröckchenteilchen dargestellt.")
; Erfolgreiche Simulation
(proposition 'simulation_1 "Die Simulation findet auf einem Simulationsfeld statt.");
(proposition 'simulation_2 "Es werden grosse Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt");
(proposition 'simulation_3 "Es werden kleine Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt");
(proposition 'simulation_4 "Ich starte die Simulation.");
(proposition 'simulation_5 "Die Kugeln bewegen sich nach dem Start der Simulation.")
(proposition 'simulation_6 "Die Kugeln prallen ab und zu aufeinander.");
(proposition 'simulation_7 "Die grossen Kugeln aendern dann ihre Bewegungsrichtung.");
(proposition 'simulation_8 "Ich beende die Simulation. ");
; Makroskopische Beschreibung des Experiments der Lernphase
(proposition 'simulation_9 "Luft befindet sich in einer Rauchkammer.")
(proposition 'simulation_10 "Zigarettenrauch befindet sich in einer Rauchkammer.")
(proposition 'simulation_11 "Die Rauchkammer wird unter ein Mikroskop gespannt.")
(proposition 'simulation_12 "Die Rauchkammer wird durch einen Spalt mit Licht bestrahlt.")
(proposition 'simulation_13 "Die Zigarettenrauchbroeckchen zittern unter dem Mikroskop.")
; Beschreibung der Modellbeziehung zwischen Simulation und dazugehörigen Experiment
(proposition 'simulation_14 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen.");
(proposition 'simulation_15 "Zigarettenrauch ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_16 "Luft ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_17 "Zigarettenrauch besteht aus Zigarettenrauchbroeckchen.")
(proposition 'simulation_18 "Das Zittern der Zigarettenrauchbröckchen wird als Richtungsver-
änderung der Teilchen des Zigarettenrauchs dargestellt.");
;*****
; Erklärungszusammenhänge in der Geschichte
; 1. Erklärung, warum die Baele kreuz und quer fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_22) 'g1_23)
;*****
;Erklaerungszusammenhaenge im Experiment in der Simulationsphase
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe
(explain '(simulation_14 simulation_15 simulation_17) 'simulation_2)
(explain '(simulation_14 simulation_16) 'simulation_3)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Zigarettenbröckchen

```

```
(explain '(simulation_7) 'simulation_13)
; 2. Makroskopische Erklärung der Beobachtung im Experiment: analog der makroskopischen Er-
klärung des Posttestexperiments
(explain '(simulation_9 simulation_10 simulation_11) 'simulation_13)
;*****
;Erklaerungszusammenhaenge der erfolgreichen Konstruktion des Zitterns der grossen Kugeln
; Erklärungskette, warum die Baelle in der Simulation kreuz und quer fliegen.
(explain '(simulation_2 simulation_3 simulation_4) 'simulation_5)
(explain '(simulation_5) 'simulation_6)
(explain '(simulation_6) 'simulation_7)
;*****
; Erklaerung im Posttest-Experiment zur Brownschen Bewegung
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_11 exp_brown_13) 'exp_brown_14)
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_12) 'exp_brown_15)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Tuschebröckchen
(explain '(exp_brown_15) 'exp_brown_9)
; Wie beim Experiment zur Simulation eine makroskopische Erkläerung, die die Beobachtung auf
den experimentellen Aufbau zurueckfuehrt.
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_9)
;*****
; Analogien
; Analogien zwischen Geschichte und Prä-/Posttest-Experiment
; Die Analogie wurde durch den ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen Experiment und Geschich-
te bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_15 exp_brown_1) '(g1_18 exp_brown_9) )
(analogous '(g1_16 exp_brown_2) '(g1_18 exp_brown_9) )
(analogous '(g1_17 exp_brown_3) '(g1_18 exp_brown_9) )
;*****
; Erklärungsanalogien zwischen Test-Experiment und Lernphasen-Experiment
; 1. Modellbeziehungen
; a. Tuschebröckchen vs. Zigarettenrauchbröckchen
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_15 exp_brown_11) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_17 exp_brown_13) '(simulation_2 exp_brown_14) )
; b. Wasser vs. Luft
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_3 exp_brown_15) )
(analogous '(simulation_16 exp_brown_12) '(simulation_3 exp_brown_15) )
; Entsprechend gilt es für das Erklärungsziel, das Zittern der Tusche-, bzw. Zigarettenrauch-
teilchen
(analogous '(simulation_7 exp_brown_15) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 2. Makroskopische Erklärungen sind teilweise ebenfalls analog
(analogous '(simulation_9 exp_brown_1) '(simulation_13 exp_brown_9) )
(analogous '(simulation_10 exp_brown_2) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 3. Disanalogie
; Die Erkläerung der Ballbewegung in der Geschichte ist eine andere als die Erkläerung der Teil-
chenbewegung in der Simulation
; (disanalogous '(simulation_4 g1_21) '(simulation_5 g1_23) )
;*****
(data '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3 exp_brown_4 exp_brown_5 exp_brown_6 exp_brown_7
exp_brown_8 exp_brown_9
simulation_9 simulation_10 simulation_11 simulation_12 simulation_13))
(gross_on)
(wtp '(500))
(run_exp)
```

ECHO listet folgende Ergebnisse dieses Laufs auf:

Network has settled by cycle 83.

```
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 84
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 1.3392367
Total times: 84
EXP_BROWN_1 has activation: 0.77274185
EXP_BROWN_10 has activation: 0.72215825
EXP_BROWN_11 has activation: 0.5312406
EXP_BROWN_12 has activation: 0.55701584
EXP_BROWN_13 has activation: 0.5312406
EXP_BROWN_14 has activation: 0.73426366
EXP_BROWN_15 has activation: 0.775408
EXP_BROWN_2 has activation: 0.77274185
EXP_BROWN_3 has activation: 0.7293732
EXP_BROWN_4 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_5 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_6 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_7 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_8 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_9 has activation: 0.8501362
G1_1 has activation: 1.3451863E-4
G1_10 has activation: 1.3451863E-4
G1_11 has activation: 1.3451863E-4
G1_12 has activation: 1.3451863E-4
G1_13 has activation: 1.3451863E-4
G1_14 has activation: 1.3451863E-4
G1_15 has activation: 1.3451863E-4
G1_16 has activation: 1.3451863E-4
G1_17 has activation: 1.3451863E-4
G1_18 has activation: 1.3451863E-4
G1_19 has activation: 1.3451863E-4
G1_2 has activation: 1.3451863E-4
G1_20 has activation: 0.009209339
G1_21 has activation: 0.009209339
G1_22 has activation: 0.009209339
G1_23 has activation: 0.009209339
G1_24 has activation: 1.3451863E-4
G1_25 has activation: 1.3451863E-4
G1_26 has activation: 1.3451863E-4
G1_27 has activation: 1.3451863E-4
G1_28 has activation: 1.3451863E-4
G1_29 has activation: 1.3451863E-4
G1_3 has activation: 1.3451863E-4
G1_30 has activation: 1.3451863E-4
G1_31 has activation: 1.3451863E-4
G1_4 has activation: 1.3451863E-4
G1_5 has activation: 1.3451863E-4
G1_6 has activation: 1.3451863E-4
G1_7 has activation: 1.3451863E-4
G1_8 has activation: 1.3451863E-4
G1_9 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_1 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_10 has activation: 0.7727122
SIMULATION_11 has activation: 0.72932875
SIMULATION_12 has activation: 0.65999925
SIMULATION_13 has activation: 0.8482613
SIMULATION_14 has activation: 0.721066
```

SIMULATION_15 has activation: 0.53291047
SIMULATION_16 has activation: 0.5527648
SIMULATION_17 has activation: 0.53291047
SIMULATION_18 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_2 has activation: 0.7617189
SIMULATION_3 has activation: 0.7253881
SIMULATION_4 has activation: 0.39116886
SIMULATION_5 has activation: 0.52815723
SIMULATION_6 has activation: 0.5375892
SIMULATION_7 has activation: 0.6763305
SIMULATION_8 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_9 has activation: 0.7727122

Entsprechend der Markierung der Propositionen der Beschreibung der Experimente als evident („DATA“) und ihrer folgenden besonderen Aktivierung werden in Simulation und Geschichte die Propositionen aktiviert, die durch analoge Erklärungen mit dem Experiment verbunden sind.

Die Aktivierungen für die das Zittern erklärenden Propositionen der Geschichte als auch der Simulation liegen etwa bei Werten zwischen 0.3 und 0.8. Mit diesem Ergebnis gibt ECHO eine mögliche Erklärung, warum nach dem Lernen mit der Simulation zwar ein deutlicher Anteil, aber nicht alle Versuchspersonen eine „richtige“ Erklärung des Testexperiments mit dem Teilchenmodell gefunden haben, während ein großer Teil „falsche“ Erklärungen gab: Die erklärenden Propositionen des Teilchenmodells werden zwar aktiviert, aber nicht stark dominant, sondern in etwa gleichem Ausmaß, wie die „falsche“ Erklärungsanalogie aus der Geschichte. Wenn beide Erklärungsmöglichkeiten verbleiben, könnte von einer Versuchsperson eine von beiden Erklärungsmöglichkeiten benutzt werden. Insgesamt deckt dieses Verhalten von ECHO beim Erklären der Brownschen Bewegung im Posttest den zu erklärenden vierten Aspekt der empirischen Daten ab, dass nämlich im Posttest deutlich häufiger Erklärungen des Brownschen Bewegung mit dem Teilchenmodell geäußert wurden als im Prättest. Dass aber nicht alle Versuchspersonen diesen Erklärungsweg gewählt haben, steht ebenfalls nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Simulation.

Auch für den fünften zu erklärenden Aspekt der Daten, dass nämlich ein Teil der Versuchspersonen, der in der Lernphase eine Lösung der Lernaufgabe mit der Konstruktionsumgebung erreicht, diese Lösung nicht auf die Posttestaufgabe übertragen hat, weist ECHO auf eine mögliche Deutung an: Alte Analogien (wie hier beispielsweise die gelesene Geschichte) behalten in diesem Modell ihre analogen Bindungen zum Experiment und könnten die neu Erworbenen in ihrer Stärke (Wirkung) überflügeln.

8.7.1.2 Lösen der Aufgabe zur Brownschen Bewegung nach dem Lesen der Fischgeschichte

Die Ergebnisse der Simulation zur Brownschen Bewegung nach dem Lesen der Fischgeschichte sind im Anhang aufgelistet. Sie entsprechen weitgehend den Ergebnissen der Simulationen nach dem Lesen der Ballgeschichte.

Damit gibt das Verhalten von ACME für die Test- und Lernaufgabe der Brownschen Bewegung eine mögliche Erklärung für den ersten Aspekt der empirischen Daten: Es können kaum geschichtenspezifische „richtige“ Übertragungseffekte auf die Testaufgaben festgestellt werden. Laut den Ergebnissen der entsprechenden ACME-Läufe liegt das vor allem daran, dass die rein beschreibende Erklärung des Phänomens auf der makroskopischen Ebene (durch den experimentellen Aufbau) syntaktisch zwar der Erklärung der Geschichte entsprechen kann, inhaltlich (semantisch) ihr jedoch nicht entspricht.

Auch der zweite zu erklärende Aspekt der empirischen Daten, dass die Brownsche Bewegung im Vortest nicht „richtig“ erklärt wird, wird von ECHO genauso wie nach dem Lesen der Ballgeschichte gezeigt.

Entsprechendes gilt für den dritten Aspekt, dass nach der Lernphase neue „richtige“ analoge Beziehungen gebildet werden, den vierten Aspekt, dass nach der Lernphase häufiger „richtige“ Erklä-

rungen gefunden werden, sowie den fünften Aspekt, für den ECHO genauso, wie nach dem Lesen der Ballgeschichte eine mögliche Deutung anbietet.

8.7.2 Modellierung der Diffusionsaufgabe

8.7.2.1 Modellierung der Diffusionsaufgabe nach dem Lesen der Ballgeschichte

Bildung von Analogien nach dem Lesen der Ballgeschichte

Die Kommandodatei und der Ergebnisausdruck dieser Simulation befinden sich im Anhang.

Entscheidend für eine spätere Erklärung des Diffusionsexperiments mithilfe einer Analogie zur Ballspielgeschichte ist, ob für die makroskopisch-beschreibende Ursache-Wirkungs-Annahme, dass der violette Farbstoff (aufgrund des Versuchsaufbaus) durch den Dialyseschlauch hindurchdringt, der gelbe jedoch nicht, eine analoge Ursache-Wirkungs-Annahme in der Geschichte gefunden wird. Dabei müssen den Farbstoffen unterschiedlich große Bälle als analoge Entsprechungen zugewiesen werden, wobei die kleinen Bälle durch das Netz passen, die großen jedoch nicht. Während aber in der Ballgeschichte das Fliegen der kleinen Bälle durch das Netz (bzw. das Abprallen der großen Bälle) auch damit begründet wird, dass die kleinen Bälle durch die Netzmaschen passen (die großen jedoch nicht), ist diese Begründung auf der makroskopischen Ebene des Experiments nicht möglich. Auf der rein beschreibenden Ebene kann das Durchdringen des violetten Farbstoffs (bzw. das Nichtdurchdringen des gelben Farbstoffs) durch den Dialyseschlauch als Konsequenz des experimentellen Aufbaus (mit Wasser gefüllter Dialyseschlauch mit den beiden Farbstoffen liegt in einem mit Wasser gefüllten Behälter) erkannt werden. Wieder verhält es wie bei der Simulation des Testexperiments zur Brownschen Bewegung so, dass die unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Propositionen im Testexperiment und in der Geschichte auf verschiedene Weise formuliert werden können, die dann auch unterschiedliche „falsche“ analoge Verknüpfungen zur Folge haben. Allerdings gibt es aufgrund der inhaltlich unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Mechanismen keine Formulierung, die zu „richtigen“ Analogien führt (zumindest nicht, wenn die Erklärung der Ballgeschichte beibehalten und nicht deutlich reduziert wird).

Das ACME-Modell findet die Ursache-Wirkungs-Analogie und die entsprechenden Analogien ihrer Argumente, deren Prädikaten und Objekten mit deutlicher Aktivierungsstärke zwischen der Geschichte und dem Versuch (im Anhang ist das Ergebnis des ersten ACME-Laufs im Anschluss an die Auflistung der Kommandodatei aufgeführt).

ACME bringt diese beiden syntaktisch ähnlichen, semantisch aber unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Propositionen miteinander in analoge Beziehungen, wobei teilweise semantisch unsinnige Analogien entstehen: Z.B. werden die größeren und kleineren Maschen des Netzes als analog zu dem Raum innerhalb bzw. außerhalb des Dialyseschlauchs erkannt. Das Modell hat damit die wesentlichen Analogien zwischen dem gelben Farbstoff und den großen Bällen, die das Netz nicht durchfliegen können, bzw. dem violetten Farbstoff und den kleinen Bällen, die das Netz durchfliegen können, gefunden. Aber es hat auch semantisch unsinnige Zuordnungen gebildet. Zudem fällt auf, dass die wichtigen Analogiehypothesen der Objekte (gelber Farbstoff und große Bälle, violetter Farbstoff und kleine Bälle) nur mit relativ schwachen Aktivierungswerten belegt sind.

Zusammenfassend hat das kognitive Modell die wesentlichen Analogiebeziehungen zwischen der Ballspielgeschichte und dem Diffusionsexperiment, die für eine der Geschichte analoge Erklärung des Diffusionsexperiments nötig sind (gelbe Farbe und große Bälle, violette Farbe und kleine Bälle, Dialyseschlauch und Netz, sowie die dazugehörigen Ursache-Wirkungs-Relationen), mit teilweise schwachen Hypothesenaktivierungen gefunden. Daneben bildet es aber aufgrund der syntaktischen Ähnlichkeit semantisch unterschiedlicher Elemente auch analoge Entsprechungen, die inhaltlich unsinnig sind.

Die Simulation zeigt also ebenso wie die empirischen Daten (6 von 16 Versuchspersonen lösen die Prätestaufgabe mit der Geschichtsanalogie), dass die bei der Erstellung der Geschichte intendierten Analogien gebildet werden können, sie zeigt aber auch, dass teilweise unsinnige Analogien gebildet werden, die einen Teil der Probanden verwirrt haben könnten, bzw. dass die Analogien zur Geschichte zu schwach ausgeprägt sind, um sich gegen eventuell andere Analogiequellen durchsetzen

zu können, die den Versuchspersonen vertraut sind. Solche Fälle, in denen die Versuchspersonen von vorne herein gar nicht die Geschichte, sondern andere Analogien aus ihrem Erfahrungsbereich verwendet haben, können wie erwähnt in der Simulation nicht erfasst werden, weil nicht gezielt und detailliert erhoben wurde, ob und gegebenenfalls welche anderen Analogiequellen von den Versuchspersonen benutzt wurden.

Finden einer Lösung mithilfe der gebildeten Analogien

Die Kommandodatei und der Ergebnisausdruck dieser Simulation befinden sich im Anhang.

Die ermittelten Ursache-Wirkungs-Analogien können in das Simulationsmodell ECHO eingegeben werden, das die Problemlösephase simuliert, in der eine Erklärung des Diffusionsexperiments gebildet wird.

Im Ergebnis zeigt sich, dass diejenigen Propositionen der Ballspielgeschichte, die in den Erklärungsanalogien enthalten sind, im Gegensatz zu allen anderen Propositionen der Ballspielgeschichte mit hohen Werten bei der Problemlösung aktiviert werden. Die Ursache-Wirkungs-Beziehungen der Geschichte werden also nach dem ECHO-Modell bei der Erklärung des Diffusionsexperiments benutzt.

Dieser Teil der Simulation zur Erklärungsfindung des Experiments verhält sich zusammenfassend also so, dass er Analogien zur Geschichte ab dem Moment zur Erklärung des Experiments nutzt, in dem sie vorliegen. Kritisch für die Erklärung des Diffusionsexperiments mithilfe der Analogien aus der Geschichte ist in der Simulation also wieder die Bildung der Analogie im ersten Schritt.

Wird dieses Ergebnis für die Erklärung des Versuchspersonenverhaltens benutzt, so kann der große Anteil von Versuchspersonen, die die Analogie nicht nutzen, damit erklärt werden, dass beispielsweise Analogien aus anderen vertrauenswürdigeren Bereichen gebildet werden, oder sich aufdrängende unsinnige Analogien die Versuchsperson verwirren.

Bildung neuer Analogien nach erfolgreicher Konstruktion eines Teilchenmodells mit der Modellierungsumgebung

Die Kommandodatei und der Ergebnisausdruck dieser Simulation befinden sich im Anhang.

Durch die nachfolgende Benutzung der Simulationsumgebung wird wieder eine neue umfassende Analogie zwischen dem Erklärungsbeispiel des Lernphasenexperiments und dem Testexperiment aufgebaut, die im nächsten ACME-Lauf nachgebildet werden soll. In der Simulation wird vorausgesetzt, dass die Simulationsaufgabe erfolgreich bearbeitet wurde, d.h., der Tonzylinder wurde mit aus einzelnen Rechtecken mit Lücken zusammengebaut, sodass kleine Teilchen, die Wasserstoffteilchen darstellen sollen, zwischen den Lücken hindurchfliegen können, während große Teilchen (Sauerstoffteilchen darstellend) nicht durch die Lücken passen und deshalb die Darstellung des Tonzylinders auf der Teilchenebene nicht durchdringen können.

Der entscheidende Unterschied zur Analogiefindung im Prätest ist - ähnlich wie beim Versuch zur Brownschen Bewegung -, dass nach dem erfolgreichen Arbeiten mit der Simulation zur Analogiebildung auf eine komplettere Lösung der Erklärung eines makroskopischen Phänomenen mit der Teilchenhypothese zurückgegriffen werden kann. Damit können neue Propositionen in die Darstellung eingehen:

1. Zusätzlich zur Darstellung der geglückten Simulation kann der Versuch aufgenommen werden, der in der Simulation bearbeitet wurde (der Versuch ist der Testaufgabe ähnlich).
2. Die Modellbeziehungen zwischen makroskopischem Versuch und Modellwelt können für den Simulationsversuch formuliert werden.
3. Da sowohl in der Instruktion zur Simulation als auch vom Versuchsleiter erwähnt wurde, dass nach einer allgemein akzeptierten Hypothese alle Stoffe aus Teilchen bestehen, kann diese Hypothese zur Modellbeziehung auch für die Testaufgabe als Proposition formuliert werden. Ähnlich wie in der entsprechenden Simulation der Erklärungsfindung zur Brownschen Bewegung werden aber auch für die Erklärungsziele, das Durchdringen des violetten Farbstoffs

(bzw. Nichtdurchdringen des gelben Farbstoffs) die Modellrelationen formuliert. Während dies für das Lernphasenexperiment durch die „richtige“ Konstruktion des Teilchenmodells begründet werden kann, muss diese Modellrelation für das Erklärungsziel des Textexperiments (wie beim Experiment zur Brownschen Bewegung) als notwendige Annahme formuliert werden. Insgesamt ist damit bei der Aufgabenbearbeitung ein komplexer Quellbereich aufgebaut worden, der ein makroskopisches Experiment, die dazugehörige Modellierung auf der Teilchenebene, sowie die verbindenden Modellbeziehungen enthält. Das für die Erklärung der Posttestaufgabe verfügbare Wissen ist bereits dem so genannten Fallwissen sehr ähnlich, bei der zur Lösung eines neuen Problems die Lösung eines ähnlichen alten Problems herangezogen wird.

ACME findet im Simulationslauf wieder die Analogien zwischen den Ursache-Wirkungs-Relationen, bzw. auch die zwischen den Propositionen, die als Argumente der Ursache-Wirkungs-Relationen aufgeführt werden. Die Analogien zwischen den dazugehörigen Objekten (also den kleinen Kugeln und dem violetten Farbstoff, bzw. den großen Kugeln und dem gelben Farbstoff) werden mit geringeren Aktivierungsstärken (etwa zwischen 0.2 und 0.25) der entsprechenden Analogie-Units erkannt.

d) Finden einer Erklärung der Prä-/Posttestaufgabe mithilfe der Analogien aus der Geschichte und dem Arbeiten mit der Modellierungsumgebung

Für den letzten ECHO-Lauf wird die Beschreibungen des ersten ECHO-Laufs (für die Simulation der Erklärung des Diffusionsexperiments nach dem Lesen der Geschichte) übernommen und mit den Erklärungsanalogien ergänzt, die von ACME nach dem Arbeiten mit der Simulationsumgebung gefunden wurden.

Zudem wird die vom Leiter gegebene Aussage, dass alle Stoffe aus kleinsten Teilchen bestehen, als besonders stark gewichteter Fakt angegeben.

Unter diesen Bedingungen werden die Propositionen der Modellierungslösung, die durch die Analogien an das Experiment gebunden sind, fast genauso stark wie die Propositionen der Geschichte aktiviert.

Hier sind für die unvollständige Analogiebildung wiederum die gleichen Faktoren verantwortlich wie bei der Analogiebildung zur Geschichte: Während bei der Modellierung ein detaillierter Ursache-Wirkungs-Mechanismus für das Verhalten der Kugeln leicht identifiziert werden kann, ist dies beim Experiment nicht möglich, da dort das Verhalten der Farbstoffe lediglich auf die Konfiguration des Experiments zurückgeführt werden kann. Trotzdem werden die wesentlich intendierten Analogien mit allerdings teilweise schwacher Aktivierung der entsprechenden Analogie-Units erkannt.

8.7.2.2 Modellierung der Diffusionsaufgabe nach dem Lesen der Fischgeschichte

Die Kommandodatei und der Ergebnisausdruck dieser Simulation befinden sich im Anhang.

Nach der Simulation der Gruppe, die die Fischgeschichte las, ergeben sich in den 4 Phasen der Simulationsfolge ähnliche Ergebnisse wie für die Gruppe, die die Ballgeschichte las. Dieses Ergebnis der Simulationsläufe zeigt, dass der erste Aspekt der empirischen Ergebnisse - dass die gelesenen Geschichten nur wenig Einfluss haben - auch für das Diffusionsexperiment in den Simulationsläufen modelliert wird. Damit werden auch die Aspekte 2, 3 und 4 vom Verhalten der Simulation für die Gruppe erfasst.

8.8 Zusammenfassung der Ergebnisse der kognitiven Simulationen

In diesem Kapitel wurde versucht, mit einem Simulationsmodell bestehend aus den beiden lauffähigen Simulationsmodellen ACME und ECHO zu zeigen, wie die zentralen Ergebnisse der Studie 3 für prototypische Versuchspersonen zustande kommen könnten.

Für das Simulationsmodell wurden prototypische Simulationen der beiden Gruppen durchgeführt, die die beiden unterschiedlichen Geschichten lasen. Für jeden Versuch (einen zur Diffusion und einen zur Brownschen Bewegung) wurde für jede der beiden Prototypen je eine Kombination aus 4 aufeinander folgenden Simulationsphasen berechnet.

Als Prototypen wurden Versuchspersonen angenommen, die eine analoge Übertragung der Geschichte auf das Testexperiment zeigten und eine „richtige“ Teilchenerklärung des Lernphasenexperiments konstruiert hatten. Die Simulation dieser Versuchspersonengruppe sollte zum einen ihre Ergebnisse generieren, andererseits aber auch Hinweise darauf geben, warum auch Versuchspersonen, die nach dem Lesen der Geschichte keine Analogie benutzten, aber eine „richtige“ Lösung der Konstruktionsaufgabe erreichten, diese „richtige“ Lösung in vielen Fällen in der Posttestaufgabe anwendeten.

Als Sonderfälle, die aus dem Rahmen der Untersuchung heraus fallen, wurden diejenigen Versuchspersonen behandelt, die weder eine analoge Übertragung der Geschichte auf den Prätest noch eine richtige Lösung der Erklärungsaufgabe der Lernphase erreicht hatten, weil sie keine der beiden angebotenen Analogien zur Lösung von Prä- bzw. Posttest benutzten.

In der ersten Phase bildete das Modell ACME analoge Verknüpfungen zwischen der jeweils gelesenen Geschichte und dem Experiment, das im Prätest erklärt werden sollte. In der zweiten Phase benutzte das Modell zur Erklärungsfindung ECHO von ACME gefundene Erklärungsanalogien, um eine Erklärung des Prätestexperiments zu generieren. In der dritten Phase bildete ACME wieder Analogien zwischen dem Prä-/Posttestexperiment und der kompletten „richtigen“ Erklärung, die die Versuchspersonen in der Lernphase mittels der Konstruktion eines dynamischen Teilchenmodells des Lernphasenexperiments erarbeitet hatten.

Folgende empirischen Ergebnisse der Studie 3 sollten durch die kognitive Simulation generiert werden:

1. Die Simulation der Analogiebildung nach dem Lesen der Geschichten mit ACME sollte das Ergebnis generieren, dass nach dem Lesen der beiden Geschichten nur bei einer Minderheit der Versuchspersonen (6 von 16) die eigentlich erwarteten analogen Beziehungen gebildet werden, wobei alle erwarteten Analogien bei der Diffusionsaufgabe auftreten.
Für die Aufgabe zur Brownschen Bewegung generierte die Simulation keine sinnvollen Ursache-Wirkungs-Analogien zwischen Experiment und Geschichte, weil das Wasser als makroskopisch kaum wahrgenommener entscheidender Teil des Phänomens wegen mangelnder Ähnlichkeit nicht in eine analoge Beziehung zu den Objekten der Geschichte gebracht wurde. Für die Diffusionsaufgabe ergaben sich entsprechend den empirischen Ergebnissen teilweise die bei der Erstellung der Geschichte intendierten Analogien. Es wurden von der Simulation wegen der mangelnden Ähnlichkeit von Experiment und Geschichte aber auch teilweise unsinnige Analogien gebildet. Dies könnte als Hinweis darauf aufgefasst werden, dass ein Teil der Probanden durch konkurrierende Analogiemöglichkeiten nicht zu den intendierten Analogien zwischen Geschichte und Experiment kam. Solche Fälle, in denen die Versuchspersonen von vorne herein gar nicht die Geschichte, sondern andere aus dem Alltag bekannte Analogien verwendet haben, können in der Simulation nicht erfasst werden, weil nicht gezielt und detailliert erhoben wurde, ob und gegebenenfalls welche anderen Analogiequellen von den Versuchspersonen benutzt wurden.
2. Die Simulation sollte wie die Studie 3 das Ergebnis generieren, dass nach einer erfolgreichen Lernphase deutlich mehr Analogien zwischen einer „richtigen“ Lösung der Modellierungsprobleme und den Prä-/Posttestaufgaben gefunden werden.
Als Eingabe für diesen ACME-Lauf wurde hier zusätzlich berücksichtigt, dass die Instruktion zum Arbeiten mit der Konstruktionsumgebung ausdrücklich auf den Modellcharakter des Teilchenmodells der Simulationsumgebung in Bezug auf die zu erklärenden Phänomene hinwies. Wenn - worauf Äußerungen der Versuchspersonen hinweisen - diese Modellbeziehung für abhängige und unabhängige Variable des Lern- und des Testexperiments übernommen wurden, ergab der ACME-Lauf die erwarteten Analogien für Modell- und für Erklärungsbe-

ziehungen zwischen dem „richtig“ konstruierten Teilchenmodell und makroskopischem Phänomen bei beiden Aufgabentypen (Brownsche Bewegung und Diffusionsexperiment). Die entscheidende Ursache dieses Simulationsverhaltens liegt darin, dass diese komplette Lösung des Lernphasenexperiments (mit den Modellrelationen) eine deutliche Analogie zum Testexperiment zeigt, wenn hier ebenfalls die Existenz von Modellrelationen für unabhängige und abhängige Variable (im Fall des „Diffusionsexperiments“) bzw. zu erklärendem Phänomen (Zittern der Tuschbröckchen im Fall der Brownschen Bewegung) angenommen wird.

3. Die Simulation sollte die Testaufgaben im Posttest unter Berücksichtigung der analogen Beziehungen aus beiden Quellbereichen (der jeweils gelesenen Geschichte und der erfolgreichen Bearbeitung der Modellierungsaufgaben) besser erklären als im Prätest. Dieses Verhalten der Erklärungsfindung ergab sich für beide Aufgabentypen. Ursache sind die zusätzlichen Analogien, die sich aus den ACME-Läufen zur Analogiebildung nach einer kompletten Erklärung der Lernaufgabe durch das „richtig“ konstruierte Modell ergaben. Wenn diese Analogien in den ECHO-Modellierungen der Erklärungsfindung beider Testaufgaben berücksichtigt werden, ergeben sich relativ starke Aktivierungen für die „richtigen“ Erklärungspfade.
4. Die Simulation sollte einen Hinweis darauf geben, warum ein Teil der Versuchspersonen die richtige Lösung nach der Lernphase nicht auf die Testaufgaben überträgt. In den erwähnten abschließenden ECHO-Läufen zur Erklärungsfindung zeigte sich, dass zwar die Erklärungen der Konstruktionsphase deutlich aktiviert waren, dennoch waren die „falschen“ Erklärungen der Geschichte immer noch deutlich aktiviert. Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis darauf sein, dass die „richtigen“ Analogien des Teilchenmodells auch nach einer solchen Lernphase immer noch mit anderen Analogien zur Erklärung von Phänomen konkurrieren, die abhängig von der Stärke der jeweiligen Analogien sich bei einem deutlichen Teil der Schülerinnen und Schüler durchsetzen.

Insgesamt zeigt damit das hier verwendete kognitive Modell zur Analogiebildung und Erklärungsfindung von Phänomenen mit dem Teilchenmodell, dass die Kombination von sehr allgemein verstandener Analogiebildung (die dann auch die Beziehung von Modell bzw. Theorie und Anwendungsfall umfasst) in der Lage ist, die prototypischen empirischen Ergebnisse dieser Studie zu reproduzieren. Dementsprechend wären also die zur Analogiebildung führenden wahrgenommenen Ähnlichkeiten zwischen angebotenen Erklärungsmodell und dem Phänomen für die Analogiebildung und die darauf aufbauende Erklärung eines Phänomens entscheidend.

Für die Planung von Lernprozessen ergibt sich nach diesem Modell die Konsequenz, Erklärungsmodelle genau auf ihre Analogiebeziehungen zu den zu erklärenden Phänomenen zu untersuchen. Vermutlich bilden sich bei kognitionspsychologisch ungeeigneten Analogien nicht die gewünschten, sondern falsche Erklärungen oder die Modelle haben gar keinen Effekt, weil Alltagsanalogien auch nach dem Lernprozess stärker wirken als die Erklärungsmodelle des Unterrichts.

Die Ergebnisse lassen sich als Hinweis darauf sehen, auch die Lernvorgänge anderer empirischer Studien und didaktischer Ansätze zur Einführung des Teilchenmodells im Licht eines solchen oder ähnlichen Lernprozessmodells beleuchten zu können.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Kapitel

- fasst die theoretischen Ergebnisse zusammen.
- beschreibt zusammenfassend die Lernumgebung
- fasst die empirischen Ergebnisse zusammen.
- stellt weitere Forschungs- und Entwicklungsfragen, die aus dieser Arbeit resultieren.

9.1 Ergebnisse der Arbeit

9.1.1 Ausgangspunkte und Aufgabenstellung

Die seit über 25 Jahren empirisch immer wieder bestätigten Probleme beim Erlernen eines angemessenen Umgang mit Teilchenmodellen sind bisher noch nicht gelöst worden. In dieser Situation unternimmt diese Arbeit in einem eng begrenzten Sektor der chemischen Fachdidaktik, dem der individuellen kognitiven Lernprozesse beim Erwerb des Teilchenmodells, theoretische und empirische Untersuchungen. Der Teil dieser Arbeit, der sich mit diesen kognitiven Lernprozessen beschäftigt, wird mit den dafür geeigneten psychologischen und kognitionswissenschaftlichen Methoden bearbeitet, während fachdidaktische Methoden für die inhaltliche Diskussion des Teilchenmodells angewendet werden. Weil schon die Untersuchung Lernprozesse allein einen großen Bereich umfasst, werden von der relativ engen Themenstellung etwas weiter entfernte Gebiete ausgeklammert.

Erkenntnistheoretisch geht diese Arbeit von einem interpretativen Realismus aus, so wie ihn Lenk (1998) beschrieben hat. Obwohl auch nach diesem Ansatz keine letzten Aussagen über die externe Realität von Phänomenen gemacht werden, weil Interpretation und Realität wechselseitig voneinander „imprägniert“ sind, beziehen sich theoretische und empirische Untersuchungen auf die wahrgenommene Welt (die Welt der „Erscheinungen“). Empirische Untersuchungen sind aus dieser Sicht keine Überprüfungen theoretischer Konstrukte an einer unabhängigen Realität, sondern wissenschaftliches Handeln, in dem Interpretationskonstrukte und Realität miteinander in Wechselwirkung treten. Stabilisiert sich diese Wechselwirkung, so ist die Einbeziehung der - als solchen grundsätzlich nie unabhängig von den Interpretationskonstrukten beschreibbaren - Realität in den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess so weit gelungen, wie dies nach dem interpretativen Realismus möglich scheint.

Obwohl der Ansatz dieser Arbeit dem eher herkömmlichen empirischen Vorgehen in den Humanwissenschaften verpflichtet ist, sieht er geisteswissenschaftliche - insbesondere phänomenologisch orientierte - Ansätze zur Sinnstiftung beim Lernprozess als notwendig an. Einen besonderen Wert

erhalten auf der Bewusstseinssebene sinnstiftende Verfahren dadurch, dass sie das bewusste Erleben des Lernenden adäquat beschreiben können.

Als allgemeine Beschreibungssprache für die verschiedenen Bereiche dieser Arbeit wurde eine abstrakte Form der Allgemeinen Modelltheorie gewählt, die geeignet erscheint, alle hier wichtigen Beziehungen zwischen komplexen Bereichen zu beschreiben, aber auch andere didaktische Ansätze zur Einführung des Teilchenmodells - z.B. den systemorientierten - daraufhin zu untersuchen, ob und gegebenenfalls wie dort Modellbeziehungen eingesetzt werden.

Im Gegensatz zum phänomenologisch orientierten Systemansatz zur Einführung des Teilchenmodells wird in dieser Arbeit die Auffassung vertreten, dass es letztlich nicht um einen „Sprung zu den Atomen“ geht, sondern um eine langsame Veränderung und Erweiterung der es alltäglichen Denkens und Sprechens hin zu den unanschaulichen quantenmechanischen Beschreibungen der makroskopischen und submikroskopischen physikalischen Welt. Dies wird vor allem damit begründet, dass letztlich auch die dem Bewusstsein zugängliche Alltagswelt quantenmechanisch beschrieben werden muss, falls ein fachlich aktuellerer Standard verlangt wird. Eine unmittelbare Konfrontation von Anfängerinnen und Anfängern mit dieser hochabstrakten Beschreibungsweise der bewusst erlebten Welt scheint auch aus der Sicht dieser Arbeit eine klare Überforderung der Schülerinnen und Schüler.

Für die Kognitionswissenschaften wird hier entsprechend dem interpretativen Realismus die sogenannte schwache Interpretation vertreten: Die Hilfsmittel und Modelle der Kognitionswissenschaften werden lediglich als hilfreiche Interpretationskonstrukte verstanden, die bei Beschreibung und Verständnis des Erwerbs des Teilchenmodells helfen können und selbst natürlich auch der Notwendigkeit zur Modifikation unterliegen, wenn entsprechende Untersuchungen dies erfordern sollten.

9.1.2 Computergestützte Konstruktionsumgebung für das Teilchenmodell

Für das analogiebasierte Lernen eines Teilchenmodells gibt es nicht *das* völlig richtige konkrete Analogiemodell, weil die Andersweltlichkeit des Teilchenmodells dies unmöglich zu machen scheint. Computermodelle des Teilchenmodells können als Analogien des wissenschaftlichen Teilchenmodells aufgefasst werden und bieten sich wegen ihrer praktischen unbegrenzten Flexibilität und Anpassbarkeit als Quellbereiche für analogiebasiertes Lernen an. Für die Untersuchungen dieser Arbeit und den Einsatz im Unterricht wurde deshalb in den letzten 10 Jahren teilweise mit anderen (Hollstein, 2001) eine Software entwickelt, die eine aktive Konstruktion von dynamischen Teilchenmodellen zur Erklärung von makroskopischen Phänomenen erlaubt.

9.1.3 Kognitive Aufgabenanalyse

Die Aufgabenanalyse dieser Arbeit führt die Erklärungsaufgaben zur „Gasdiffusion“, zur Brownschen Bewegung und zur thermischen Luftexpansion auf die Lehrplanelemente des ersten Teilchenmodells zurück und zeigt dabei auf, wie komplex eine konsequente Teilchenerklärung sein muss, wenn sie den experimentellen Kontext der Phänomene einbezieht (z.B. Teilchenvorstellungen der experimentellen Apparatur, die ja das Phänomen unmittelbar mitbestimmt). Damit zeigt die Aufgabenanalyse, dass ein fachlich adäquates Teilchenmodell nach den van-der-Waalsschen Modellen her einfache Wechselwirkungen zwischen den Teilchen zusätzlich zu den Eigenschaften des idealen Gasmodells annehmen muss. Die Analyse der korrekten Erklärungsgänge von „Gasdiffusion“, Brownscher Bewegung und thermischer Luftexpansion macht deutlich, dass für detaillierte, kohärente und logisch konsistenten Phänomenerklärungen mit dem Teilchenmodell überraschend kompliziert vernetzte und umfassende Kenntnisse erforderlich sind, was letztlich den Unterricht über das Teilchenmodell sicherlich nicht einfacher macht. Vermutlich - und das wurde in den empirischen Untersuchungen dieser Arbeit auch angenommen - blenden Lernende (und Lehrende) am Anfang Teile der Komplexität der Modellerklärungen aus, um zunächst die entscheidenden Aspekte der Teilchenerklärung eines Phänomens zu fokussieren.

9.1.4 Analogiebasiertes Lernmodell für das anfängliche Lernen des Teilchenmodells

Aus kognitionspsychologischer Sicht bietet sich für den Erwerb eines komplexen, hypothetischen und andersweltlichen Teilchenmodells insbesondere im Anfangsstadium der Mechanismus des analogiebasierten Lernens an, der außer für die analogen Übertragungen sogenannter ferner Analogien auch für das Lernen und Anwenden von kompletten Erklärungsbeispielen und Modellen auf konkrete Fälle geeignet ist. Der Fokus der Arbeit liegt hier zunächst darauf, ob und welche Analogien bzw. Modelle gebildet werden und ob die Analogiebildung geeignet ist, Modellfehler und richtige Modellbildung der Literaturbefunde sowie die Ergebnisse einer empirischen Untersuchung dieser Arbeit zu erklären. Um den Umfang der Arbeit vertretbar zu halten, beschränkt sich diese Arbeit auf die Untersuchung der analogiebasierten Lernprozesse mit dem konnektionistischen Modell ACME von Holyoak & Thagard (1989) in Verbindung mit dem konnektionistischen Modell ECHO zur Erklärungsfindung. Beide Programme gehen von einem Kohärenztheoretischen Ansatz aus und ermöglichen mit ihrem konnektionistischen Ansatz auch die Analogie- und Erklärungsfindung in Situationen, in denen Lernende z.B. mit konkurrierenden Analogien oder Erklärungswegen konfrontiert sind.

9.1.5 Empirische Untersuchungsergebnisse zum Lernmodell und zur Lernwirksamkeit der Lernumgebung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 3 empirische Untersuchungen durchgeführt, die sich hauptsächlich mit analogiebasierten Lernprozessen beim Erwerb des Teilchenmodell beschäftigten. Die erste qualitative und explorative Studie zeigte, dass sich die Modelle des analogiebasierten Lernens dazu eignen, den Aufbau eines ersten Teilchenmodells zu beschreiben, machte aber auch klar, dass in einer umfangreicheren Studie die Items für ein adäquates Prä-Posttest Design erst entwickelt werden mussten.

In dieser zweiten Studie wurden mit der „Gasdiffusion“ und der thermischen Luftexpansion zwei Aufgaben und mit der Beurteilung von Aussagen zu den entsprechenden Phänomenen (Magdeburger Kugel/Saugnapf, Volleyball/Fahrradbahnhof) eine einfache Itemform identifiziert, mit denen Untersuchungen zur Lernwirksamkeit beim Erlernen der Teilchenmodell mit Simulationen durchgeführt werden können. Dabei wurden für Prä- und Posttest und die Lernphase jeweils Phänomene benutzt, die zwar in ihrer Oberflächenerscheinung unterschiedlich, bezüglich der Teilchenerklärung aber identisch sind. Weiter zeigte diese zweite empirische Studie, dass zwei Gestaltungsmöglichkeiten des Lernens mit bewegten Bildern, nämlich die Produktion von Selbsterklärungen des Versuchspersonen beim Studieren von dynamischen Teilchenmodellen sowie die Unterteilung der dynamischen Simulationen in Zeitintervalle keine positive Wirkung auf den Lernerfolg haben.

Die dritte Studie konzentrierte sich stärker auf die empirische Untersuchung des analogiebasierten Lernprozessmodells. Hier zeigte sich, dass zwei für Analogiezwecke konstruierte Geschichten von den Versuchspersonen nur wenig zur Analogiebildung benutzt wurden und wahrscheinlich deswegen kaum der Geschichte entsprechende Erklärungen für ein Experiment zur Diffusion und zur Brownschen Bewegung konstruiert wurden. Falls jedoch in einer zweiten Lernphase von den Versuchspersonen ein „korrektes“ dynamisches Teilchenmodell konstruiert wurde, das das jeweilige Experiment erklärte, so übertrug ein größerer Anteil der Versuchspersonen diese Lösung auf das in den Oberflächeneigenschaften verschiedene Phänomen des Posttests und erklärte die Testaufgabe „richtig“ mithilfe des Teilchenmodells. Dabei fiel weiter auf, dass im Prätest das Phänomen zur Brownschen Bewegung überhaupt nicht mit Hilfe der analogen Geschichten „korrekt“ erklärt wurde, während dies im Falle des Diffusionsphänomen mehreren Versuchspersonen gelang. Ein beträchtlicher Anteil der Versuchspersonen übertrug jedoch auch eine „richtige“ Lösung der Konstruktionsphase nicht auf die Posttestaufgabe, sondern verharrte meist bei dem „falschen“ Erklärungsmodell, das sie nach dem Lesen der Geschichte angegeben hatten.

9.2 Untersuchung und Weiterentwicklung des analogiebasierten Lernmodells durch die Simulation der angenommenen Lernprozesse einer empirischen Studie

Eine Kombination der Simulationsmodelle ACME und ECHO kann die zentralen Ergebnisse der Studie 3 nachbilden. Die zusammengefassten zentralen Ergebnisse der Simulation zeigen folgendes:

- Die direkte Analogiebildung zwischen Geschichten und Testexperimenten führt aufgrund unterschiedlicher Strukturen im Falle der Brownschen Bewegung zu gar keinen analogen Lösungen, während dies im Fall der Diffusion mit größerer Wahrscheinlichkeit gelingt.
- Wenn nach der Konstruktionsphase die analoge Verknüpfung der kompletten Erklärungsfälle (bestehend aus Experiment, Modellbeziehungen und Teilchenerklärung) angenommen wird, gelingt der Simulation - wie den Versuchspersonen - eine Erklärung der Testphänomene mit dem Teilchenmodell.

Damit erbringt die Simulation der dritten Studie einen Hinweis, dass das analogiebasierte Lernen in Verbindung mit einem konnektionistischen Modell zur Erklärungsfindung in der Lage ist, Analogien und Erklärungsfindungen so zu generieren, dass die markanten Ergebnisse prototypischer Fälle dieser Untersuchung generiert werden können.

9.3 Vergleich der didaktischen Folgerungen des Lernprozessmodells mit anderen Ansätzen

Am Schluss der Arbeit kann der lernprozessorientierte Ansatz zum Erwerb des Teilchenmodells mit anderen didaktischen Ansätzen verglichen werden. Die exemplarischen Vergleiche sollen auf dem Hintergrund der Annahmen und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit vorgenommen werden, also die eher didaktisch orientierten Ansätze aus einer eher lernpsychologischen Sicht beleuchten. Folgende Punkte werden dabei berücksichtigt, soweit es sinnvoll erscheint:

- Wissenschafts- und erkenntnistheoretischer Standpunkt
- Gewählte Begrifflichkeit zur Beschreibung der diskreten Modelle der Stoffe
- Verhältnis zur empirischen Überprüfung des eigenen Ansatzes
- Gewählter Ansatz für die Lernaufgabenanalyse
- Annahmen über den Lernprozess
- Didaktischer Ansatz für den Lernprozess

9.3.1 Der systemorientierten Ansatz von Buck

Buck systemorientierter Ansatz (z.B. 1994, 2004) nimmt nicht den erkenntnistheoretischen Standpunkt (des interpretationsorientierten Realismus) dieser Arbeit an, sondern steht eher einem phänomenologischen Ansatz nahe, der die bewusste, differenzierte und breite Auseinandersetzung mit der Erfahrungswelt (beispielsweise der Stoffe) in der Vordergrund stellt. Bucks Orientierung an der bewussten Wahrnehmung weist pädagogisch-didaktische und wissenschaftliche Vorzüge auf, weil sie in großer Nähe zur bewussten Stoffwahrnehmung der Lernenden liegt und in ihrer phänomenologisch geprägten Sichtweise unerlässliche kritische, heuristische und deskriptive Funktionen gegenüber der Sichtweise dieser Arbeit einnehmen kann, die wesentlich stärker von wissenschaftsmethodischen Prämissen geprägt ist und in ihrer Tendenz, Lernvorgänge modellartig (und in Bucks

Terminologie: präzise) zu beschreiben, stärker den Gefahren des Reduktionismus ausgesetzt ist (zu Bedeutung und Funktion der phänomenologischen Orientierung für die psychologische Forschung s.a. Graumann & Metraux, 1977).

Buck (2004) steht dem Begriff des Modells skeptisch gegenüber, gebraucht aber nach dem umfassenden Modellverständnis dieser Arbeit beim Systemvergleich des makroskopischen Systems Erde mit dem System Atom ebenfalls Modellübertragungen anschaulicher Systemeigenschaften, um beim Erörtern des Systems Atom an bekannte Vorstellungen anknüpfen zu können. Dabei entstehen in der Sichtweise dieser Arbeit Modellbildungsfehler, die aus der Übertragung makroskopischer, anschaulicher Modelleigenschaften auf das teilweise andersweltlich und unanschauliche System Atom entstehen.

Aus naturwissenschaftlich-fachlicher Sicht tritt im Ansatz von Buck ein weiteres Problem auf, das aus dem bei ihm entscheidenden Gegensatz zwischen bewusst sinnlich und denkend erlebter Phänomenwelt und der gänzlich andersweltlichen, nur denkend erlebbaren atomaren Welt resultiert, die quantenmechanisch beschrieben wird. Aus naturwissenschaftlicher Sicht muss nämlich sowohl die atomare als auch die makroskopische Welt quantenmechanisch beschrieben werden, wenn die wissenschaftlich umfassendere Beschreibungsform gewählt werden soll. Für die quantenmechanische Sichtweise wird die dem bewussten Erleben nähere klassische Mechanik zum Sonderfall ihres Systems. Für Lernende muss also in dieser Perspektive auch für die makroskopische Welt eine neue, hochabstrakte Beschreibungsform erlernt werden. Anstatt von einem „Sprung zu den Atomen“ würde besser von der langsamen Entwicklung einer neuen Beschreibungssprache der makroskopischen und atomaren physikalischen Wirklichkeit gesprochen, die Schritt für Schritt aus dem bewussten Erleben der makroskopischen Umwelt entwickelt werden muss. Dieser langsame Entwicklungsprozess, der Modellbildungsfehler beim Erlernen der aktuellen Beschreibungssysteme akzeptiert und auf ihre stückweise Korrektur im Laufe der Zeit hofft, entspricht dem kognitions-wissenschaftlichen Verständnis des Lernprozesses beim Erwerb des Teilchenmodells, das in dieser Arbeit vertreten wird.

Nach dem Vergleich des Wissenschaftsverständnisses und des Gebrauchs des Modellbegriffs in beiden Ansätzen ist es nicht verwunderlich, dass bei Buck eine Aufgabenanalyse nicht in der gleichen Weise wie in dieser Arbeit vorgenommen wird. Nach dem Ansatz dieser Arbeit muss für die Aufgabenanalyse genau festgelegt werden, welche Aufgaben mit dem Teilchenmodell gelöst werden sollen und mit welchen Regeln dabei Stoffphänomene auf welche Modellvorstellungen zurückgeführt werden sollen. Bucks an der Phänomenologie orientierter Ansatz strebt keine so eng gefasste Aufgabenbeschreibung an, sondern orientiert sich wahrscheinlich an mit dem Bewusstsein nachvollziehbaren Zusammenhängen, ohne enggefaste Erklärungsketten vorgeben zu wollen wie in der Aufgabenanalyse dieser Arbeit.

Bucks Begriff des Lernens hängt wahrscheinlich eng mit seinem Begriff des Verstehens zusammen, der anstatt des Lernens mit Modellen angestrebt wird. Die Analyse der individuellen Lernprozesse steht darüber hinaus nicht im Fokus der Betrachtungen von Buck. Der Ansatz dieser Arbeit strebt zwar ebenfalls ein Lernen durch Verstehen an, das hier aber als Lernen durch Verknüpfen neuer Lernbereiche mit Vertrautem verstanden wird. Die vorliegende Arbeit wählt damit - wie oben gezeigt - einen anderen, kognitiv geprägten Beschreibungsansatz für die neuen Lerninhalte und das Altvertraute, ebenso wie ein eher kognitives Verständnis des Begriffs Verstehen, der in seiner (eventuell zu eng gefassten Schärfe) Unterschiede aufweist zum subjektiv erfahrbaren phänomenologischen Verständnis dieses Begriffs.

Nach den empirisch orientierten Methodenstandards der vorliegenden Arbeit müsste neben dem obigen eher theoretischen Vergleich empirisch geprüft werden, ob mit dem systemorientierten Ansatz nicht entscheidend bessere Lernerfolge erzielt werden als beispielsweise mit dem Ansatz dieser Arbeit. Eine nach Regeln des empirischen Arbeitens durchgeführte empirische Überprüfung seines Ansatzes (z.B. im Vergleich zu anderen Ansätzen und im Hinblick auf im einzelnen stattfindende kognitive Lernprozesse) steht aber nicht im Zentrum der Arbeiten von Buck. Aus der Perspektive des erkenntnistheoretisch realistischen Ansatzes dieser Arbeit wären solche empirischen Untersuchungen sinnvolle Ergänzungen zu einem eher phänomenographischen Vorgehen, das einen wichtigen Platz auf der theoretischen Seite einnimmt. Andererseits muss auch gesehen werden, dass das

empirische Instrumentarium kaum so weit entwickelt ist, subtile Aspekte phänomenographischer Analysen klar zu erfassen.

Die entscheidende Frage nach diesem Vergleich der beiden Ansätze lautet: Kann die Sichtweise dieser Arbeit überhaupt sinnvoll auf den Ansatz von Buck angewendet werden? Der Autor der Arbeit bejaht diese Frage zunächst insofern, dass bei Buck die individuellen Lernvorgänge nicht detailliert betrachtet werden und die genaue Betrachtung seines Ansatzes auf analogiebasierte Lernprozesse hin eine wichtige Dimension einführen kann. Allerdings kann im Rahmen dieser Arbeit die Frage nicht mehr gelöst werden, ob die modellbasierte Sichtweise nicht auch in die phänomenologisch orientierte Betrachtung integriert und damit vielleicht die aufgezeigten Probleme entschärft werden könnten.

9.3.2 Der Ansatz von Mikelskis-Seifert

Der Ansatz von Mikelskis-Seifert (2002, 2003a,b) steht dem dieser Arbeit insofern näher, als die Autorin ausdrücklich einen kritischen Realismus als wissenschaftstheoretische Grundlage wählt. Zwar liegt dieser Arbeit eine interpretationsorientierte Variante des Realismus zugrunde, beide Arbeiten messen theoretische Aussagen direkt oder indirekt - nämlich im Fall der interpretationsorientierten Realismus, bei dem die Realität nur mithilfe von Interpretationsschemata wahrgenommen werden kann. Dies hat allerdings für die Praxis der empirischen Untersuchungen in beiden Ansätzen keine großen Unterschiede zur Folge. Empirische Untersuchungen spielen sowohl bei Mikelskis-Seifert als auch in der vorliegenden Arbeit eine wichtige Rolle zur Exploration und zur Überprüfung von Hypothesen im Feld der Arbeit. In der Folge der wissenschaftstheoretischen Positionierung im Bereich realistischer Erkenntnistheorien tritt bei Mikelskis-Seifert zwanglos der Begriff des Modells in das Zentrum ihrer Arbeit.

Ein deutlicher Unterschied tritt bei der Art der Aufgabenanalyse auf, die bei Mikelskis-Seifert bezüglich der Lernaufgaben eher angedeutet wird. In der vorliegenden Arbeit geben die Aufgabenanalysen die Lösungselemente vor, die für eine „richtige“ Lösung notwendig sind. Die Verbindung der Lösungselemente zu einer Gesamtlösung steht nicht im Vordergrund, weil für Bereiche der Erklärungsaufgaben unterschiedliche Verbindungsstrukturen möglich sind. Für die hier gewählte Art von Aufgabenanalyse werden die Zielvorgaben dem Lehrplan entnommen und in Form von Phänomenerklärungen mithilfe des eingeführten Teilchenmodells operationalisiert. Wenn die Zielvorgaben eines Bildungsplan nicht geteilt werden, könnten ganz andere Lernzielbestimmungen verwendet werden, entscheidend ist die genaue Festlegung auf die Zielvorgaben und die genaue Beschreibung des Wissens, das für die Erklärung gebraucht wird. In der Aufgabenanalyse dieser Arbeit wird anhand einer deklarativen Programmierung der Erklärungsgänge der ausgewählten Aufgaben untersucht, wie eine vollständige Lösung, die den Bildungsplanvorgaben entspricht, aussehen kann. Der Erstellungsprozess einer solch detaillierten Lösung bringt (wie teilweise in dieser Arbeit) überraschende Ergebnisse, wenn etwa klar wird, welch umfassendes Alltags-, Physik-, Chemie- und Modellwissen für eine erschöpfende Erklärung nur auf dem Zielniveau der Bildungsplan notwendig ist.

Mikelskis-Seifert beschränkt sich bei ihrer Aufgabenanalyse der konkreten Lernaufgaben auf eher allgemeine fachliche Bemerkungen zu den Problemen, die in ihrer Unterrichtseinheit benutzt werden, wahrscheinlich weil sie die gewählten Probleme aus fachwissenschaftlicher Sicht als relativ einfach lösbar erachtet. Eine Aufgabenanalyse, die z.B. zeigen würde, wie genau die Zielvorstellungen der Aufgabenlösung und wie genau die dazu benötigten Wissensselemente aussehen, könnte aus der Sicht dieser Arbeit wichtige Details ihres Ansatzes aufklären, wie beispielsweise:

- Welche Wissensvoraussetzungen müssen gegeben sein, um z.B. bestimmte Aspekte eines Erklärungs- oder Vorhersageproblems überhaupt mithilfe einer genau beschriebenen Repräsentationsform zu erklären oder vorherzusagen?
- Welche genauen Unterschiede der Erklärungen ergeben sich, wenn eine Erklärungsaufgabe mithilfe zweier oder mehrerer unterschiedlicher Repräsentationen erklärt wird (eine Frage, die im Zentrum der Arbeit von Mikelskis-Seifert steht)?

- Welche Eigenschaften des Modellbegriffs lassen sich aus den unterschiedlichen Erklärungen einer Aufgabe durch unterschiedliche Repräsentationen ableiten (auch diese Frage steht im Zentrum der Arbeit von Mikelskis-Seifert)?
- Eignen sich nach den Ergebnissen der Aufgabenanalyse alle Aufgaben gleich gut?

Die detaillierte Analyse würde wahrscheinlich genauer zeigen, welche Lernaufgaben und Repräsentationsformen auf welche Weise dazu beitragen können, dass die Lernenden sich von den Repräsentationsformen abstrahieren und was sie dabei über den allgemeinen Modellbegriff lernen können. Der zweite bedeutsame Unterschied zwischen der vorliegenden Arbeit und der von Mikelskis-Seifert betrifft die Klärung der kognitiven Lernprozesse beim Arbeiten mit den multiplen Repräsentationen. Diese Frage stand nicht im Fokus der Arbeit von Mikelskis-Seifert. Da Mikelskis-Seifert Phänomene mithilfe mehrerer Repräsentationsformen bearbeiten lässt, wird wahrscheinlich auch hier das analogiebasierte Schließen und Lernen beim Vergleich dieser komplexen Phänomene und Repräsentationsformen eine wichtige Rolle spielen. Hier könnte eine kognitive Analyse beispielsweise mit Hilfe des Modells ARCS (Holyoak & Thagard, 1989) zeigen, welche von mehreren Repräsentationsformen in einem auf der Analogiebildung basierenden Auswahlprozess von Lernenden zur Aufgabebearbeitung gewählt wird, das Modell ACME könnte Hinweise geben, welche Analogien nach einer Auswahl genau gebildet werden und wie die Analogiebildung mit anderen Repräsentationsformen im Vergleich dazu aussehen würde. Die Weiterverarbeitung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden bei der Analogiebildung mit verschiedenen Repräsentationen könnte dann den Methoden untersucht werden, die schon im Abschnitt 3.4.2 erwähnt wurden.

9.3.3 Der Ansatz von Vollebregt

Vollebregt (1998) setzt sich in ihrer Arbeit nicht explizit mit den erkenntnistheoretischen Grundlagen ihres Ansatzes auseinander. An verschiedenen Stellen (etwa bei dem Diagramm zur Verdeutlichung der Modellerklärung eines makroskopischen Phänomens auf S.37 wird deutlich, dass die Autorin wahrscheinlich ebenso wie diese Arbeit eine Variante der realistischen Erkenntnistheorien zugrunde legt. Passend zum vermuteten realistischen Grundansatz ihrer Untersuchung führt Vollebregt eine Evaluationsstudie zur Überprüfung ihres Ansatzes durch.

Vollebregt beschränkt sich in ihrer Arbeit (ähnlich wie es in dieser Arbeit geschieht) auf ein Teilchenmodell, das ihrer Auffassung von den Lernenden im Anfangsstadium auch wirklich aufgebaut und zu Erklärungswecken gebraucht werden kann. Dabei besteht sie ausdrücklich auf der visuellen Vorstellbarkeit dieses Modells (Kap.3.3) und diskutiert nicht wie z.B. Buck (1991, 1994) den Gedanken, dass Lernende besser von vorneherein mit der „ganzen“ Naturwissenschaft anstatt mit einem überholten, teilweise irreführendem Modell zu arbeiten. Auch in diesem Punkt geht diese Arbeit einen ähnlichen Weg wie Vollebregt (1998).

Vollebregt diskutiert die Aufgaben, mit denen sich die Lernenden auseinandersetzen sollten, eingehender als Mikelskis-Seifert (2002), jedoch geht sie in dieser Analyse nicht so weit wie die vorliegende Arbeit, die das gleiche Modell (Vollebregt, 2002, S.37) der Erklärung makroskopischer Veränderungen durch submikroskopische Abläufe zugrunde legt. In der vorliegenden Arbeit werden die „richtigen“ Aufgabenlösungen auf der Grundlage dieses Modells bis auf basale Wissenseinheiten zurückgeführt, so dass eine detaillierte Untersuchung der Erklärungen von Lernenden auf dem Hintergrund dieser Analyse möglich ist.

Ein wesentlicher Unterschied zur Arbeit von Vollebregt ist, dass sie durch Aufwerfen von Problemlagen versucht, den Lernprozess in einer Gruppe zu initiieren, so dass möglichst eigenständige Bearbeitungswege und Lösungen hin zu den erwünschten Ergebnissen führen. Ebenso wenig wie bei Mikelskis-Seifert ist es also Aufgabenstellung dieser Arbeit, ein genaues Modell des individuellen kognitiven Lernprozesses zu erstellen. Die Resultate der vorliegenden Arbeit bezüglich des Einflusses analoger Lernprozesse beim Erwerb des Teilchenmodells könnten aber auch bei der Diskussion des Lernwegs in Vollebregts Ansatz nützlich sein.

9.4 Sich anschließende Forschungs- und Entwicklungsfragen

Diese Arbeit hat sich - vom Standpunkt der Pädagogik gesehen - mit den individuellen Lernprozessen beim Erwerb und der Nutzung des Teilchenmodell beschäftigt, einen engen, hier von psychologischen Methoden dominierten Arbeitsbereich der breiten pädagogischen Fragestellungen in diesem Feld. Obwohl diese Verengung damit begründbar ist, dass individuelle Lern- und Nutzungsprozesse auch in allen anderen Annäherungen an das Teilchenmodell spätestens anwendbar (und nötig) werden, wenn Schülerinnen und Schüler konkrete Phänomene mit dem Teilchenmodell bearbeiten, wächst die Zahl der Fragestellungen auch mit dieser Arbeit: Hat die konsequente Anwendung einer solchen Art von Lernen langfristig positive Effekte? Induziert das Lernen mit aktiv konstruierten Teilchenmodell spezifische „falsche“ Vorstellungen, z.B. im Bereich des Wissens über Modelle? Gibt es, z.B. abhängig vom Vorwissensstand, Versuchspersonen, die durch diese Lernform eher behindert werden? Hat die Beschränkung der Simulationsdarstellung auf bewegte und unbewegte Teilchen negative Effekte und die Auseinandersetzung mit personenspezifischen Alltagskonzepten, die mit solchen Simulationen nicht erfasst werden können? Wie „passt“ das Lernen mit manipulierten Modellsimulationen zu anderen Annäherungen an das Teilchenmodell, z.B. dem Ansatz zum Lernen „über“ Modelle (Mikelskis-Seiffert, 2002) oder den Ansatz über die Systemeigenschaften der verschiedenen involvierten Ebenen (Buck, Rehm, Seilnacht, 2004)?

Für unterrichtspraktische Zwecke bleibt die Lernumgebung in verschiedene Richtungen weiterzuentwickeln: Zum einen sollten weitere Stoffphänomene aufgenommen werden, die z.B. auch in fortgeschritteneren Lernstadien verwendet werden können. Wichtig erscheint auch, dass Schülerinnen und Schüler in der Simulation weitere verbreitete alternative Konzepte von Teilchen konstruieren und bearbeiten können. Dazu gehört zum Beispiel die Ausdehnung oder Massezunahme von Teilchen bei Temperaturerhöhung. Schließlich könnten unterstützende Programmmechanismen das Lernen fördern - z.B. ein automatischer Vergleich zwischen makroskopischer Animation und submikroskopischem Teilchenmodell, der eine Entsprechung des Verhaltens der beiden Ebenen anzeigt. Auch in kognitionspsychologischer Sicht bleiben viele spezifische Aspekte einer solch komplexen Lernumgebung zu untersuchen: Im theoretischen Bereich sollte das vorgeschlagene kognitionspsychologische Lernmodell weiter ausgearbeitet werden und daraufhin untersucht werden, wie es auf andere Ansätzen, beispielsweise den von Buck (2004), Mikelskis-Seiffert (2002) oder Vollebregt (1998) anwendbar ist, bzw. inwieweit es sich mit den Annäherungen ergänzen kann. Wichtig erscheinen zudem weitere empirische Untersuchungen, die das Lernmodell überprüfen und die rechnergestützte Konstruktionsumgebung formativ wie summativ evaluieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Ackermann, T. (1992). *Physikalische Biochemie. Grundlagen der physikalisch-chemischen Analyse biologischer Prozesse.* Berlin : Springer.
- [2] Anderson, B.R. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In: Lijnse, P. L., Licht, P., Vos, W.de & Waarlo, A.J.. *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles.* Utrecht, Centre for Science and Mathematics Education
- [3] Anderson, J.R. & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought.* Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- [4] Anderson, J.R., Reder, L.M. & Simon, H.A. (1998a). Radical Constructivism an Cognitive Psychology. In: D. Ravitch (Ed.), *Brookings Papers on Education Policy.* Washington D.C.: Brookings Institution Press.
- [5] Anderson, J.R., Reder, L.M. & Simon, H.A. (1998b). Applications and Misapplications of Cognitive Psychology to Mathematics Education. Nicht publiziertes Manuskript. Verfügbar unter: <http://act.psy.cmu.edu/ACT/papers/misapplied-abs-ja.html>
- [6] Atkins, P.W. (1990). *Physikalische Chemie.* VCH, Weinheim.
- [7] Aufschnaiter, S. & Welzel, M. (1997). Wissensvermittlung durch Wissensentwicklung: Das Bremer Komplexitätsmodell zur quantitativen Beschreibung von Bedeutungsentwicklung und Lernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften.* 3, 2., 43-58.
- [8] Baars, G. & Christen, H.R.: Die Teilchenvorstellung - ein Unmodell?, *Chemie in der Schule* 42, 3, 113-114.
- [9] Baddeley, A.D. (1997). *Human Memory: Theory and Practise (Revised Addition).* UK: Psychology Press. Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? Trends in *Cognitive Science*, 4, 11, 417-423.
- [10] Ballstaedt, S.P. (1997): *Wissensvermittlung. Die Gestaltung von Lernmaterial.* Weinheim: Beltz Psychologische Verlags Union.
- [11] Barke, H.-D., Bitterling, H.-D., Gramm, A., Hammer, H.-O., Hermanns, R. Leibold, Lindemann, H. & Wambach, H. (1984): *Denkschrift zur Lehrerausbildung für den Chemieunterricht in den Altersstufen der Zehn- bis Fünfzehnjährigen.* Frankfurt: Gesellschaft Deutscher Chemiker.
- [12] Barke, H.-D. & Harsch, G. (2001). *Chemiedidaktik heute.* Berlin: Springer. Barrow, G.M. (1979). *Physikalische Chemie. Gesamtausgabe.* 3. Auflage. Braunschweig: Vieweg.
- [13] Benson, D.L., Wittrock, M.C., Baur, M.E. (1993). Students' preconceptions of the nature of gases. *Journal of Research in Science Teaching*, 30,6, 587-597.
- [14] Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S. & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63, 64-66.

- [15] Bergmann, L., Schäfer, C. (1998). Lehrbuch der Experimentalphysik - Band 1: Mechanik, Relativität, Wärme. Berlin, deGruyter.
- [16] Bortz, J. (1999). Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Berlin: Springer.
- [17] Bortz, J. & Döring, N. (2002). Forschungsmethoden und Evaluation. Berlin: Springer.
- [18] Brook, A., Briggs, H. & Driver, R. (1984). Aspects of secondary students' understanding of the particulate model of matter. University of Leeds: Children's Learning in Science Project.
- [19] Brook, A. & Driver, R. (1989). Progression in Science: The development of pupil's understanding of physical characteristics of air across the age range 5-16 years. University of Leeds: Children's Learning in Science Project.
- [20] Brown, A.L. (1994). The advancement of learning. *Educational Researcher*, 23(8), 4-12.
- [21] Brown, A.L. & Campione, J.C. (1994). Guided discovery in a community of learners. In K. McGilly (Ed.). Classroom lessons: Integrative cognitive theory and classroom practice. Cambridge, MA: MIT Press.
- [22] Bruner, J. S., Goodnow, J. J., & Austin, G. A. (1956). A Study of Thinking. New York: Wiley.
- [23] Brunner, M. (2000). Der Einfluß von Selbsterklärungen und Größe der Informationseinheiten beim Lernen naturwissenschaftlicher Stoffmodelle mit Simulationen. Unveröff. Diplomarbeit: Psychologisches Institut der Univ. Heidelberg.
- [24] Buck, P. (1979). How real are atoms really? Wie wirklich sind „Teilchen“ eigentlich? *Chimica didactica*, 5, 181-194.
- [25] Buck, P. (1981). Eine Unterrichtseinheit über die Natur der Atome. *Chimica didactica*, 7, 1981, 5-25
- [26] Buck, P. (1987). Der Sprung zu den Atomen. *physica didactica*, 14, 41-45.
- [27] Buck, P. (1990). Jumping to the atoms: the introduction of atoms via nesting systems. In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. De Vos, & A.J. Waarlo (Eds.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. Utrecht: CD- Press.
- [28] Buck, P. (1992). Der Tesserakt - oder: von der Unvorstellbarkeit des Atoms. *Chimica didactica*, 18, 27-34.
- [29] Buck, P. (1994a). Die Teilchenvorstellung - ein "Unmodell". *Chemie in der Schule*, 41, 412-416.
- [30] Buck, P. (1994b). Wie kann man die Andersartigkeit der Atome lehren? *Chemie in der Schule*, 41, 460-469.
- [31] Buck, P. (1995). Über die allmähliche Überwindung des Irrtums, es ginge im Chemieunterricht um Naturerkenntnis. *Chimica didactica*, 21, 5, 175-180
- [32] Buck, P. & Kranich, E.-M. (1995). Auf der Suche nach dem erlebbaren Zusammenhang. Übersehene Dimensionen der Natur und ihre Bedeutung für die Schule. Weinheim, Basel: Beltz.
- [33] Buck, P. & Mackensen, M. (1996). Naturphänomene erlebend verstehen: Über Physik- und Chemieunterricht an Waldorfschulen und ihre erkenntnistheoretische und didaktische Grundlegung. 6. Auflage. Köln: Aulis-Verlag.
- [34] Buck, P. Rehm, M., Seilnacht, T. (2004). Der Sprung zu den Atomen. Bern: Seilnacht.
- [35] Bukatsch, F. & Glöckner, W. (1977). *Experimentelle Schulchemie, Bd. 6: Physikalische Chemie II*. Köln: Aulis.

- [36] Bündler, W., Demuth, R., Parchmann, I., Basiskonzepte - Welche chemischen Konzepte sollen Schüler kennen und nutzen, *PdN-ChiS* 52, 1, 2-7 (2003).
- [37] Burstein, M.H. (1986). Concept formation by incremental analogical reasoning and debugging. In: R.S. Michalski, J.G. Carbonell, T.M. Mitchell (Eds.). *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- [38] Carbonell, J.G. (1986). Derivational Analogy: A theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition. In R.S. Michalski, J.G. Carbonell, and T.M. Mitchell (Eds.). *Machine Learning: An artificial intelligence approach*. Vol.2, 371-392. Los Altos, CA: Morgan Kaufman.
- [39] Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [40] Carey, S. (1991). Knowledge Acquisition: Enrichment or conceptual change. In: S. Carey & R. Gelman (Eds.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and Cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [41] Charney, D.H., Reder, L.M., & Kusbit, G.W. (1990). Goal setting and procedure selection in acquiring computer skills: A comparison of tutorials, problem-solving, and learner exploration. *Cognition and Instruction*, 7, 4, 323-342.
- [42] Chi, M.T.H. (1978). Knowledge structures and memory development. In: R.S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: what develops?* Hillsdale, NJ: Erlbaum. p. 323-48
- [43] Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, M.W., Reimann, P. & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 145-182.
- [44] Chi, M.T.H., Slotta, J.D. & De Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-73.
- [45] Chinn, A. & Brewer, W.F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Journal of Educational Research*, 63, 1-49.
- [46] Chi, M.T.H., Slotta, J.D. & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of Conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-32.
- [47] Cobb, P., Yackel, E. and Wood, T. (1992). A constructivist alternative to the representational view of mind in mathematics education. *Journal for Research in Mathematics Education*, 23,1, 2-33.
- [48] Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. & Wood-Robinson, V. (1994). *Making Sense of Secondary Science - Research in Children's Ideas*. Routledge, London.
- [49] Dahlmann, W. (1997) Wie die Fußspur eines Vogels auf dem Schnee - Zur vermeintlichen Phänomenologie der atomaren Welt bei Martin Wagenschein - Teil II: Das „Phänomen“ der Brownschen Molekularbewegung. *Chimica didactica*, 23, 77, 116-153
- [50] Dahlmann, W. (1998). Em-pathisches versus anti-pathisches Naturverstehen - ein Beitrag zu einer kulturalistischen Chemiedidaktik, I. *chimica didactica*, 24, 78, 85-109.
- [51] Dahlmann, W. (1999). Wider die Einseitigkeit, Kausalität nur als Wirkursache zu sehen - Erkenntnistheoretische und anthropologische Grundlagen einer alternativen Naturwissenschaft - Ein Beitrag zu einer kulturalistischen Naturwissenschaft, II. *chimica didactica*, 25,79, 23-60.
- [52] Duit, R. (2004). *Bibliography – STCSE. Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Kiel: IPN - Leibnitz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.

- [53] Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik* 41, 6, 905 - 923.
- [54] Eckert, A. (1998). Kognition und Wissensdiagnose. Die Entwicklung und empirische Überprüfung des computergestützten wissensdiagnostischen Instrumentariums Netzwerk-Elaborierungs-Technik (NET). Lengerich: Pabst.
- [55] Ericsson, K.A., Krampe, R.T. & Tesche-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100, 363-406.
- [56] Falkenhainer, B., Forbus, K.D., & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine. Algorithm and examples. *Artificial Intelligence*, 41, 1-63.
- [57] Fischer, H.R. (1998). Die Wirklichkeit des Konstruktivismus. 2. Auflage. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme.
- [58] Fischler, H. & Peuckert, J. (1999). Stability of students conceptions concerning particle models. *Proceedings Second International Conference of the European Science Education Research Association (E.S.E.R.A.)*, 396-398.
- [59] Fladt, R. & Buck, P. (1996). Ein Dialog über die Funktion der Teilchenmodelle im Chemieunterricht. *Chemie in der Schule*, 43,2, 69-72.
- [60] Forbus, K.D. (1984). Qualitative process theory. *Artificial Intelligence*, 24, 85-165.
- [61] Forbus, K. (1988). Qualitative physics: Past, present, and future. In: H. Shrobe: Exploring Artificial Intelligence, Morgan-Kaufmann.
- [62] Forbus, K.D., Ferguson, R. & Gentner, D. (1994). Incremental structure-mapping. In: A. Ram & K. Eislet (Eds.), *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [63] Gentner, D. (1983). Structure Mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170.
- [64] Genseberger, R. (1986). Ein historisch orientierter integriert-naturwissenschaftlicher Kurs für 15-16jährige. *Chimica didactica*, 12, 197-210.
- [65] Genseberger, R. (1987). Entwicklung eines Modellbegriffs bei 15-16jährigen Schülern. *Chimica didactica*, 13, 5-20.
- [66] Gentner, D. (1982). Are scientific analogies metaphors? In D.S. Miall (Ed.). *Metaphor: problems and perspectives*. 106-132. Brighton: Harvester Press.
- [67] Gentner, D. (1983). Structure mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive science*, 7, 155-170.
- [68] Gentner, D. Toupin, C. (1986) Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, 10, 3, 277 - 300.
- [69] Gentner, D. & Clement, C. (1988). Evidence for relational selectivity in the interpretation of metaphor. In G.H. Bower (Ed.). *The psychology of learning and motivation*. 307-358. New-York: Academic Press.
- [70] Gentner, D., Brem, S., Ferguson, R.W., Markman, A.B., Levidow, B.B., Wol, P. & Forbus, K.D. (1997). Analogical reasoning and conceptual change: A case study of Johannes Kepler. *Journal of the Learning Sciences*, 6, 3-40.
- [71] Gerstenmaier, J. & Mandl. H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41, 6, 867-888.

- [72] Glasersfeld, E. (1997). Radikaler Konstruktivismus: Ideen, Ergebnisse, Probleme. Frankfurt: Suhrkamp.
- [73] Goswami, U. (2001). Analogical reasoning in children. In: D. Gentner, K.J. Holyoak, B.N. Kokinov, (Eds.). *The analogical mind. Perspectives from cognitive science*. Cambridge: MIT-Press.
- [74] Graumann, F. & Metraux, A. (1977). Die phänomenologische Orientierung in der Psychologie. In: K.A. Schneewind (Hrsg.): *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Psychologie*. München: Ernst Reinhardt Verlag.
- [75] Groeben, N. (1998). Zur Kritik einer unnötigen, widersinnigen und deskonstruktiven Radikalität. In: H.R. Fischer. *Die Wirklichkeit des Konstruktivismus*. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme.
- [76] Groeben, N. (1986). Handeln, Tun, Verhalten als Einheiten einer verstehend-erklärenden Psychologie: wissenschaftstheoretischer Überblick und Programmentwurf zur Integration von Hermeneutik und Empirismus. Tübingen : Francke.
- [77] Groeben, N. & Westmeyer, H. (1981). Kriterien psychologischer Forschung. Juventa: München.
- [78] Hayes, J. R. (1985). The problems in teaching general skills. In J. Segal, S. Chipman & R. Glaser (Eds.), *Thinking and learning, Vol. 2*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [79] Heisenberg, W. (1959). Physik und Philosophie. Frankfurt: Ullstein.
- [80] Hermann, T. (1990). Experimentiermethode in der Defensive? *Sprache und Kognition, 1*, 1-11.
- [81] Hofstadter, D.R. (2001). Epilogue: Analogy as the core of cognition. In: D. Gentner, K.J. Holyoak, B.N. Kokinov, (Eds.). *The analogical mind. Perspectives from cognitive science*. Cambridge: MIT-Press.
- [82] Hollstein, A. (2001). Computerunterstütztes Lernen auf der Basis konstruktivistischer Lerntheorien am Beispiel der Einführung in das Kugelteilchenmodell. Dissertation: Univ. Essen.
- [83] Holyoak, K. & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science, 13*, 295-356.
- [84] Holyoak, K., Gentner, D. & Kokinov, B.N. (2001). Introduction: The place of analogy in cognition. In: D. Gentner, K.J. Holyoak, B.N. Kokinov, (Eds.). *The analogical mind. Perspectives from cognitive science*. Cambridge: MIT-Press.
- [85] Hummel, J.E. & Holyoak, K. (1997). Distributed representations of structure. A theory of analogical access and mapping. *Psychological Review, 104*, 427-466.
- [86] Janich, P. (2000). Was ist Erkenntnis? Eine philosophische Einführung. München: Beck.
- [87] Johnson, P. & Millar, R. (1999). Symposium: *Teaching and learning the particulate model of matter. Proceedings Second International Conference of the European Science Education Research Association (E.S.E.R.A.)*, 392.
- [88] Joseph, J.H., & Dwyer, F.M. (1984). The effects of prior knowledge, presentation mode, and visual realism on student achievement. *Journal of Experimental Education, 52*, 110-121.
- [89] Keane, M.T.G. Incremental analogizing: Theory and model. (1990). In: K.J. Gilhooly, M.T.G. Keane, R.H. Logie & G. Erdos (Eds.), *Lines of thinking*. Chichester: Wiley.
- [90] Keller, J.M. (1983). Motivational design of instruction. In: C.M. Reigeluth (Ed.), *Instructional design theories and models: An overview of their current studies*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- [91] Keller, J.M. & Kopp, T.W. (1987). An application of the ARCS model of motivational design. In D.H. Jonasson (Ed.), *Instructional designs for microcomputer courseware* (401-434). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [92] Kelly, G.A. (1955) *The psychology of personal constructs*. Repr. d. Ausg. von 1955. London: Routledge.
- [93] Kintsch, W. (1974). *The representation of meaning in memory*. Hilldale, NJ.: Erlbaum.
- [94] Klahr, D. & Kotovsky, K. (1989). *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [95] Kircher, E. (1986). Vorstellungen über Atome. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie*, 34,13, 34-37.
- [96] Kircher, E. (1995): *Studien zur Physikdidaktik. Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen*. Kiel : Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- [97] Kleine, E. (1997). *Chemie lernen mit Hilfe von Analogien am Beispiel des chemischen Gleichgewichts*. Univ. Essen: Unveröff. Dissertation.
- [98] Kolodner, J. (1993). *Case-based reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- [99] Kolodner, J. (1997). Educational Implications of Analogy. A View form Case-Based Reasoning. *American Psychologist*, 52,1, 57-66.
- [100] Kotovsky, K. & Fallside, D. (1989). Representation and transfer in problem solving. In: D. Klahr & K. Kotovsky (Eds.), *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [101] Kozma, R. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13, 2, 205-226.
- [102] Kuhn, T.S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. 2. edition. Chicago: Univ. of Chicago.
- [103] Larkin, J.H. (1983). The role of problem representation in physics. In Gentner, D. and Stevens, A., (eds.), *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Press.
- [104] Lenk, H. (1998). *Einführung in die Erkenntnistheorie*. München: Fink.
- [105] Levie, H.W. & Lentz, R. (1982). Effects of text illustrations: A review of research. *Educational Communication and Technology Journal*, 30, 195-232.
- [106] Lewalter, D. (1997): *Lernen mit Bildern und Animationen*. Münster: Waxmann.
- [107] Lewis, C. (1988). Why and how to learn why. Analysis-based generalization of procedures. *Cognitive Science*, 12, 211-256.
- [108] Löffler, G. (1992) Piagets und Inhelders Interviews zum kindlichen Atomismus unter einem phänomenologischen Gesichtspunkt reinterpretiert. *Chimica didactica*, 18,1992. 85-99.
- [109] Löffler, G. (1996). Über die Grundlegung einer Verständigung über den Begriff des Atoms. *Chimica didactica*, 22,1996. 296-322
- [110] Maturana, H.R. (1985a). Biologie der Kognition. In: Ders. *Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit*. Braunschweig: Vieweg.
- [111] Maturana, H.R. (1985b). Biologie der Sprache: Die Epistemologie der Realität. In: Ders. *Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit*. Braunschweig: Vieweg.

- [112] Mayer, R.E. & Gallini, J.K. (1990). When is an illustration worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 82, 4, 715-726.
- [113] Mayer, R.E. & Andersen, R.B. (1991). Animations need narrations: an experimental test of a dual coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology* 83, 484-490.
- [114] Mayer, R.E. (1997). Multimedia Learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist*, 32, 1-19.
- [115] Mayer, R.E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge: University Press.
- [116] McGilly, K. (1994). *Classroom lessons: Integrative cognitive theory and classroom practice*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [117] Meyer, B.J. F. (1981). Prose Analyses: Procedures, purposes and problems. Paper presented as part of an Invited Symposium on Expository Text: Comprehension and Structure, at the AERA Convention in Los Angeles, 1981.
- [118] Mikelskis-Seiffert, S. (2002). Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen. Berlin: Logos-Verlag.
- [119] Mikelskis-Seiffert, S. & Fischler, H. (2003a). Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen - Stand der Forschung und Entwurf einer Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9, 75-88.
- [120] Mikelskis-Seiffert, S. & Fischler, H. (2003b). Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen - Empirische Untersuchung zur Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9, 89-103.
- [121] Miller, G.A. (1956). The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- [122] Minssen, M. & Buck, P. (1986). „Das also ist Wasser!“ oder: „Das alles ist Wasser.“ *Chimica didactica*, 12, 113-136.
- [123] Müller, M. (1995): Nochmals: Das Unmodell der Teilchen - Kritik an der Kritik. *Chemie in der Schule*, 42, 9, 336-337.
- [124] Niegemann, H.M. (2001). *Neue Lernmedien. Konzipieren, Entwickeln, Einsetzen*. Bern: Huber.
- [125] Novick, S. & Nussbau, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate model of matter: An interview study. *Science Education*, 62, 273-281.
- [126] Novick, S. & Nussbau, J. (1982). Pupils' understanding of the particulate model of matter: A cross-age study. *Science Education*, 66, 187-196.
- [127] Nüse, R. (1995). *Über die Erfindungen des Radikalen Konstruktivismus*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- [128] Opwis, K. (1992). *Kognitive Modellierung*. Bern: Huber.
- [129] Opwis, K. & Spada, H. (1994). Modellierung mit Hilfe wissensbasierter Systeme. In: T. - Herrmann & w. Tack (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich B: Methodologien und Methoden, Serie I: Forschungsmethoden der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- [130] Opwis, K. & Plötzner, R. (1996). *Kognitive Psychologie mit dem Computer*. Heidelberg: Springer.

- [131] Paatz, R. (2002). Charakteristika analogiebasierten Denkens - Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich. Berlin: Logos.
- [132] Paivio, A. (1986). Mental Representations. New York: Oxford University Press.
- [133] Peuckert, J. & Fischler, H. (1999). Concept maps as a tool for investigating and analyzing the development of students' conceptions. In: M. Komorek, Behrendt, H., Dahncke, H., Duit, R., Graeber, W., Kross, A.. *Research in Science Education - Past, Present, and Future Vol.1*. Kiel, IPN Kiel: 263-265.
- [134] Pfundt, H. (1981). Das Atom - letztes Teilungsstück oder erster Aufbaustein? Zu den Vorstellungen, die sich Schüler vom Aufbau der Materie machen. *chimica didactica*, 7, 75-94.
- [135] Pfundt, H. & Duit, R. (1994). Bibliographie. Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht. IPN-Kurzberichte. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
- [136] Piaget, J. (1975). Die Entwicklung des Erkennens II. Das physikalische Denken. Stuttgart: Klett.
- [137] Piaget, J. & Inhelder, B. (1975). Die Entwicklung der physikalischen Mengenbegriffe beim Kinde. Stuttgart: Klett.
- [138] Piaget, J. (1994). Das Weltbild des Kindes. 4.Auflage. München: dtv.
- [139] Plötzner, R. (1994). The integrative use of qualitative and quantitative knowledge in physics problem solving. Lang, Frankfurt.
- [140] Plötzner, R. (1998). Flexibilität im Problemlösen und Lernen. Konstruktion, Anwendung und Koordination von Repräsentationssystemen. Lengerich: Pabst.
- [141] Pylyshyn, Z.W. (1986). Computation and Cognition, Cambridge, MA.
- [142] Reif, F. & Heller, J.I. (1982). Knowledge Structure and problem solving in physics. *Educational Psychologist*, 17, 102-127.
- [143] Reif, F. (1987). Statistische Physik und Theorie der Wärme. Berlin: de Gruyter.
- [144] Reigeluth, C.M. (1999). Instructional-design theories and models: An overview of their current status. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum.
- [145] Reimann, P. (1997). Lernprozesse beim Wissenserwerb aus Beispielen. Analyse, Modellierung, Förderung. Bern: Huber.
- [146] Reimann, P. & Rohr, M. (1999). CoSim: Collaborative Use of Simulations. Project Presentation at the ODL Co-ordinator's Meeting, Brüssel.
- [147] Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (1997). Lehren im Erwachsenenalter. In: F. Weinert & H. Mandl (Hrsg.): *Psychologie der Erwachsenenbildung*. Göttingen: Hogrefe.
- [148] Rehm, M. (2004). „Flüchtige Stoffe bestehen meist aus Molekülen mit Atombindungen“. *Chimica didactica*, 30, 121-136.
- [149] Renkl, A., Gruber, H., Weber, S., Lerche, T., & Schweizer, K. (2003). Cognitive Load beim Lernen aus Lösungsbeispielen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 17, 93-101.
- [150] Renström, L., Anderson, B. & Marton, F. (1990). Students' conceptions of matter. *Journal of Educational Psychology*, 82, 3, 555-569.
- [151] Rieber, L.P. (1989). The effects of computer animated elaboration strategies and practice on factual and application learning in an elementary science lesson. *Journal of Educational Computing Research*. 5, 4, 431-444.

- [152] Rieber, L.P. (1990). Using computer animated graphics in science instruction with children. *Journal of Educational Psychology*, 82, 135-140.
- [153] Rieber, L.P. (1991). Animation, incidental learning, and continuing motivation. *Journal of Educational Psychology*, 83, 318-328.
- [154] Rieber, L.P. (1994). Computer, graphics and learning. Madison, WI: Brown & Benchmark.
- [155] Rohr, M. (1993). Einführung des Teilchenmodells. Eine kognitionswissenschaftlich ausgerichtete Einführung des Kugelteilchenmodells mittels ausgewählter Experimente und ihrer simulationsgestützten Interpretation. Unterrichtsreihe in der 8.ten Jahrgangsstufe des Gymnasiums. Examensarbeit zur Zweiten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, Staatliches Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien, Kaiserslautern.
- [156] Rohr, M. (1995). Kognitionspsychologisch orientierte Entwicklung einer Unterrichtsreihe: Einführung des Kugelteilchenmodells im Chemieunterricht für Anfänger. Unveröffentlichte Diplomarbeit für das Fach Psychologie. Psychologisches Institut der Universität Freiburg.
- [157] Rohr, M. (1998). The SOCRATES-ODL Project CoSim. Invited lecture at the Conference Educational Possibilities in the 21th Century Europe: Open and Distance Learning as a Challenge for Future (19- 20.11.98), Warschau.
- [158] Rohr, M. & Reiman, P. (1998a). Analyse und Förderung des Erwerbs einer abstrakten Modellvorstellung in der Chemie. Vortrag auf dem 41. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Dresden.
- [159] Rohr, M. & Reimann, P. (1998b). Reasoning with multiple representations when acquiring the particulate model of matter. In: Someren, W. van, Reimann, P., Boshuizen. P.A. & Jong, T. de: *Learning with Multiple Representations*. Oxford: Elsevier.
- [160] Rohr, M. & Reimann, P. (1999). A cognitive model to describe the process of learning the particulate model of matter and its instructional consequences. Proceedings Second International Conference of the European Science Education Research Association (E.S.E.R.A.), 195-197.
- [161] Rohr, M., Rapp, A., Brunner, M., Albrecht, J. (2001). Die Rolle von Text und Animation beim Einstieg in das Teilchenmodell der Stoffe. *Chimica didactica*, 27, 101-121.
- [162] Rusch, G. (1986). Verstehen verstehen - Ein Versuch aus konstruktivistischer Sicht. In: N. Luhmann & K.E. Schorr (Hrsg.), *Zwischen Intransparenz und Verstehen*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 40-71.
- [163] Salvucci, D.D. & Anderson, J.R. (1998). Analogy. In: Anderson, J.R. & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- [164] Scaife, M. and Rogers, Y. (1996) External Cognition: How do graphical representations work? *International Journal of Human-Computer Studies.*, 45, 185-213.
- [165] Schlöpke, W.I. (1987). Die philosophischen Annahmen (Postulate) der Atomtheorie und ihre Bedeutung bei der Behandlung der Atomhypothese im Chemieunterricht. *chimica didactica*, 13, 89-116.
- [166] Schmidt, U. & Kindmüller, M.C. (1996). Kognitive Modellierung. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag.
- [167] Schnotz, W. (1997). Zeichensysteme und Wissenserwerb. In: Gruber, H. & Renkl, A. *Wege zum Können. Determinanten des Wissenserwerbs*. Bern: Huber.
- [168] Schnotz, W. & Preuss, A. (1997). Task-dependent construction of mental models as a basis of conceptual change. *European Journal of Psychology of Education*, 12 , 185-211.

- [169] Schnotz, W., Böckheler, J. & Grzondziel, H. (1999). Individual and co-operative learning with interactive animated pictures. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 245-265.
- [170] Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13,2, 117-254.
- [171] Schnotz, W. & Lowe, R. (2003). External and internal representations in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 13, 2 , 117-123.
- [172] Schwaneberg, R. (1986). Die Brownsche Bewegung im Unterricht der Sekundarstufen I und II. *physica didactica*, 13, 13-26.
- [173] Schummer, J. (1996). Realismus und Chemie. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- [174] Seiffert, Helmut (1992). Einführung in die Wissenschaftstheorie 3. Handlungstheorie - Modallogik - Ethik – Systemtheorie. München: Beck.
- [175] Seel, N. (1991). Weltwissen und mentale Modelle. Göttingen: Huber.
- [176] Seifert, S., Fischler, H. (1999). A multidimensional approach for analyzing and constructing teaching and learning processes about particle models. In: M. Komorek, Behrendt, H. , Dahncke, H. , Duit, R. , Graeber, W. , Kross, A. *Research in Science Education - Past, Present, and Future Vol.2*. Kiel, IPN Kiel: 393-395.
- [177] Serè, M.G. (1985). The gaseous state. In: R.Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Eds.). *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press.
- [178] Singley, M.K. & Anderson, J.R. (1989). Transfer of cognitive skill. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [179] Sodian, B. (1995). Entwicklung bereichsspezifischen Wissens. In: Oerter, R. & Montada, L. *Entwicklungspsychologie*. Weinheim: Psychologie-Verlags-Union.
- [180] Soentgen, J. (1999). Phänomenologische Untersuchungen zum Stoffbegriff. *Chimica didactica*, 25, 197-221
- [181] Spiro, R. Feltovich, P., Coulson, R. & Anderson, D. (1989). Multiple Analogies for complex concepts: antidotes for analogy-induced misconception in advanced knowledge acquisition. In: S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.). *Similarity and Analogical Reasoning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [182] Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer Verlag.
- [183] Stavy, R. (1988). Children's conception of gas. *International Journal of Science Education*, 10, 553-560.
- [184] Stavy, R. (1990). Children's conception of states of matter: From liquid (or solid) to gas. *Journal of Research in Science Teaching*, 27 , 247-266.
- [185] Thagard, P. (1989). Explanatory Coherence (1989). *Behavioral and Brain Sciences*,12 , 435-502.
- [186] Thagard, P. Holyoak, K.J., Nelson, G. & Gochfield, D. (1990). Analog retrieval by constraint satisfaction. *Artificial Intelligence*, 46, 259-310.
- [187] Thagard, P. (1996). Kognitionswissenschaft. Ein Lehrbuch. Stuttgart: Klett-Cotta.
- [188] VanLehn, K., Brown, J.S., & Greeno, J. (1984). Competitive argumentation in computational theories of cognition. In W. Kintsch, J. R. Miller, & P. G. Polson (Eds.), *Methods and tactics in cognitive science*, 235-262. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- [189] Vollebregt, M.J. (1998). A problem posing approach to teaching an initial particle model. Utrecht: CD- β Press.
- [190] Vollmer, G. (1998). Evolutionäre Erkenntnistheorie. Angeborene Erkenntnisstrukturen im Kontext von Biologie, Psychologie, Linguistik, Philosophie, und Wissenschaftstheorie. 7. unveränderte Auflage, Stuttgart, Leipzig: Hirzel.
- [191] Vos, W.de (1990) Seven Thoughts on Teaching Molecules. In: In: Lijnse, P. L., Licht, P., Vos, W.de & Waarlo, A.J.. *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*. Utrecht, Centre for Science and Mathematics Education.
- [192] Vos, W.de. & Verdonk, A.H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 6, 657-664.
- [193] Vosniadou, S. (1991). Conceptual development in astronomy. In: S.M. Glynn, R.H. Yeanny & B.K. Britton (Eds.), *The psychology of learning science*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [194] Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- [195] Vosniadou, S. (1996). Towards a revised cognitive psychology for new advances in learning and instruction. *Learning and Instruction*, 6, 95-109.
- [196] Wallach, Dieter (1998). Komplexe Regelungsprozesse. Eine kognitionswissenschaftliche Analyse. Wiesbaden. Deutscher Universitätsverlag.
- [197] Weber, G. (1994). Fallbasiertes Lernen und Analogien. Weinheim: Beltz, Psychologie-Verlags-Union.
- [198] Wedler, G. (1987). Lehrbuch der physikalischen Chemie. 3.te Auflage. VCH, Weinheim.
- [199] Weidenmann, B. (1994). Informierende Bilder. In B. Weidenmann (Eds.), *Wissenserwerb mit Bildern*. Bern: Huber.
- [200] Weinert, F.E. & Mandl, H. (1997): Psychologie der Erwachsenenbildung. In: *Enzyklopädie der Psychologie ; Bd. 4, Themenbereich D : Praxisgebiete : Ser. 1 : Pädagogische Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- [201] Weinert, F.E. & Schrader, F.-W. (1997). Lernen lernen als psychologisches Problem. In: F. E. Weinert & H. Mandl. *Psychologie der Erwachsenenbildung*. Göttingen: Hogrefe.
- [202] Weizsäcker, C.F. (1982). Die Einheit der Natur. 3. Aufl. München: Hanser.
- [203] Weld, D. S. and de Kleer, J. (1990). Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- [204] Williamson, V.M., Abraham, M. R. (1995). The effects of computer animation on the particulate mental models of college chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching* 32, 5, 521-534
- [205] Winston, P.H. (1980). Learning and reasoning by analogy. *Communications of the ACM*. 23, 689-703.
- [206] Woyke, A. & Scharf, V. (2002). Wissenschaftstheoretische Aspekte und deren Bedeutung für Ziele und Wege des Chemieunterrichts, *MNU* 55. 490-49.

Anhang A

Anhang

A.1 Untersuchungsmaterial der Studie 1

A.1.1 Vortestaufgaben der Studie 1

Aufgabe 1

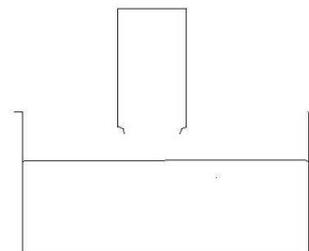
Die nebenstehende Zeichnung stellt ein Honigglas mit einem Deckel dar.



- a) Befindet sich irgend etwas im Honigglas?
- b) Was passiert, wenn man den Deckel abnimmt?
- c) Was passiert, wenn man nach dem Abnehmen den Deckel wieder aufsetzt?

Aufgabe 2

Die nebenstehende Zeichnung zeigt einen großen Behälter mit Wasser und darüber ein offenes Honigglas mit seiner Öffnung nach unten gerichtet.

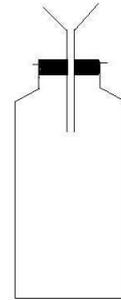


- a) Befindet sich etwas im Honigglas?

b) Was wird passieren, wenn man das umgedrehte Honigglas mit der Öffnung nach unten ins Wasser taucht?

Aufgabe 3

Rechts siehst Du eine Glasflasche. Sie ist mit einem durchbohrten



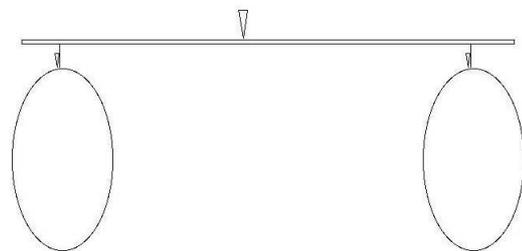
Gummistopfen verschlossen. Im Loch des Gummistopfens steckt ein Glastrichter.

a) Befindet sich irgend etwas in der Flasche?

b) Was passiert, wenn man Wasser in den Glastrichter schüttet? Warum?

Aufgabe 4

Links siehst Du die skizzierte Abbildung einer Balkenwaage (der lange Stab ist der Balken mit dem Dreieck als Aufhängungspunkt). An der



Balkenwaage hängen zwei Luftballons, die genau gleich stark aufgeblasen sind und auch genau gleich schwer sind. Der Balken der Waage befindet sich also in horizontaler Position.

a) Befindet sich etwas in den Ballons?

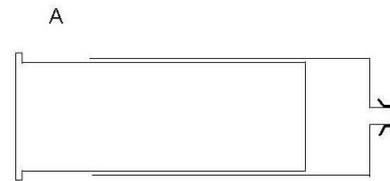
b) Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn einer der Ballons mit einer Nadel zum Platzen gebracht würde? Warum?

c) Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn aus einem der Ballons Luft herausgelassen würde? Warum?

d) Was würde mit dem Waagebalken passieren, wenn einer der beiden Ballons weiter aufgeblasen würde?

Aufgabe 5

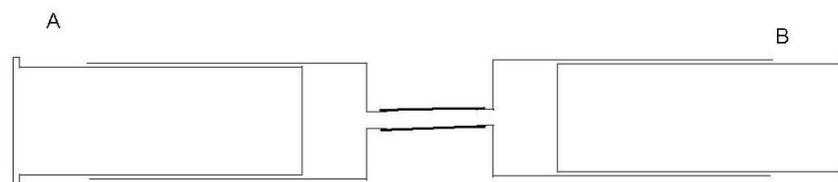
Rechts siehst Du eine Glasspritze.



- a) Was würdest Du spüren, wenn Du den Stempel in die Spritze hinein bewegst? Warum?
- b) Was würdest Du spüren, wenn Du den Stempel aus der Spritze herausziehst? Warum?

Aufgabe 6

Rechts siehst du zwei Glasspritzen, die mit einem dicht sitzenden

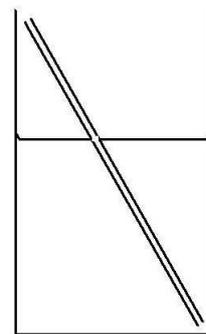


Gummischlauch miteinander verbunden sind.

- a) Was passiert, wenn Du den Stempel der Spritze A in die Spritze hinein drückst? Warum?
- b) Was passiert, wenn Du den Stempel der Spritze B herausziehst? Warum?

Aufgabe 7

Rechts siehst Du ein Trinkglas mit Orangensaft und einem Strohhalm.

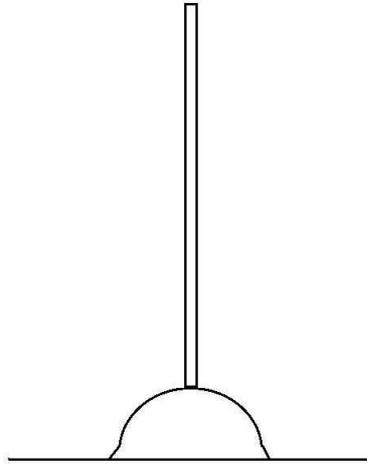


Stell' Dir vor, Du trinkst mit dem Strohhalm den Orangensaft!

- a) Was passiert, wenn Du den Saft mit dem Strohhalm trinkst?
- b) Wie kommt es, daß beim Trinken der Saft sich im Strohhalm nach oben bewegt?

Aufgabe 8

Rechts siehst Du einen Saugnapf, wie man ihn zum

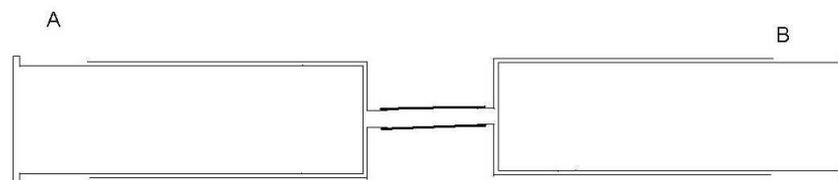


Öffnen verstopfter Abflüsse benutzt.

- Was passiert, wenn Du den Saugnapf nach unten gegen den Boden drückst?
- Warum ist es schwierig, den Saugnapf danach wieder vom Boden hoch zu ziehen?

Aufgabe 9

Rechts sind zwei Spritzen, deren Kolben bis zum Anschlag

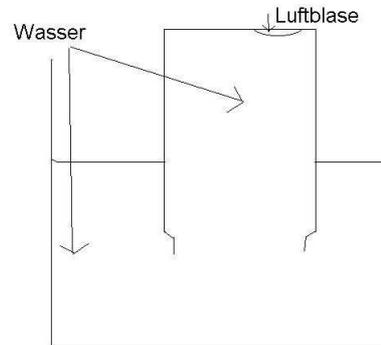


in den Spritzen stecken.

- Was spürst Du, wenn Du den Kolben der Spritze A nach außen ziehst?
- Wenn Du den Kolben nach außen gezogen hast, was ist dann in der Spritze A?
- Was passiert, wenn Du dann den Kolben wieder los läßt? Warum?

Aufgabe 10

Rechts siehst Du ein offenes Honigglas, das auf dem Kopf



stehend in ein Gefäß mit Wasser getaucht ist.

Das Honigglas ist mit Wasser gefüllt, bis auf eine kleine Luftblase, die sich an der oberen Wand des Honigglases befindet.

a) Warum bleibt das Wasser in dem Honigglas, obwohl der Wasserstand in dem Gefäß viel niedriger ist als in dem Glas?

A.1.2 Lernmaterial zur Studie 1

Die folgenden Abbildungen stellen eine Auswahl der Lernseiten dar, die beim Lernen mit Bildern bzw. mit Animationen benutzt wurden.

A.2 Simulationsläufe mit den kognitiven Modellen ACME und ECHO zur Erzeugung empirischer Befunde des Linkenheim-Experiments

A.2.1 Simulationen der Test- und Lernaufgaben zur Brownschen Bewegung

A.2.1.1 Gruppe, die die Ballgeschichte las

ACME- Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Ballgeschichte und Experiment zur Brownschen Bewegung des Prätests

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
(defaults 'acme)
(defun make_struct ()
  (make_struct 'makroskopisches_ball_modell
    'sentence
    '(all
      (
        (klasse (obj_klasse) obj_ballspiel1)
        (ballspiel (obj_ballspiel) obj_ballspiel2)
        (balle (obj_balle) obj_ballspiel3)
        (grosse_balle (obj_grosse_balle) obj_ballspiel4)
        (kleine_balle (obj_kleine_balle) obj_ballspiel5)
```

Der Aufbau der Stoffe

Um etwas über den Aufbau der Stoffe zu erfahren, kann man Stoffe durch ein Lichtmikroskop betrachten. Beim Blick durch das Lichtmikroskop sieht man, daß viele Stoffe darunter anders aussehen als vor dem bloßen Auge. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Schnee, der sich unter dem Lichtmikroskop als eine große Menge von Kristallen entpuppt:

Schnee - unvergrößert
Schnee - unter dem Mikroskop

Andere Stoffe - zum Beispiel Wasser - zeigen in ihrem Aussehen unter dem Mikroskop keinen wesentlichen Unterschied zu ihrem unvergrößerten Aussehen vor bloßem Auge.

Wasser - unvergrößert
Wasser - vergrößert

Mit einem Lichtmikroskop scheinen wir also nicht sehen zu können, wie alle Stoffe aufgebaut sind. Manche Stoffe zeigen so etwas wie kleine Aufbaubausteine, andere nicht.

Nun könnte man sich ja sagen: Ich brauche einfach ein stärkeres Mikroskop als ein Lichtmikroskop! Aber das funktioniert nicht so einfach: Lichtmikroskope können nicht stärker als ein paar tausend mal vergrößern. Und jedes komplizierte Mikroskop (z.B. ein Elektronenmikroskop), das höhere Vergrößerungen liefern könnte, zeigt Bilder, die man überhaupt nicht verstehen kann, wenn man nicht schon vor dem Betrachten weiß, was da ungefähr erscheinen muß.



Schnee im Winter, ein unvergrößertes Bild



Schneekristalle, stark vergrößert



Wasser in einem Bergbach



Wasser, vergrößert

Abbildung A.1: Seite 1 des Lernmaterials der Studie 1



Abbildung A.2: Seite 2 des Lernmaterials der Studie 1

Der Aufbau der Stoffe

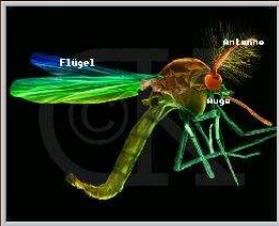
Grundsätzlich gibt es 2 Möglichkeiten, wie Stoffe bei sehr hohen Vergrößerungen (z.B. mehrere Millionen mal) aufgebaut sein können:

1. Wenn man die Stoffe bei immer stärkerer Vergrößerung anschaut, sehen sie immer gleich aus. Diese Möglichkeit kannst Du aber schon jetzt ausschließen, da Du ja schon ein Bild von Schnee unter dem Mikroskop gesehen hast, das anders aussieht als Schnee vor bloßem Auge.
2. Wenn man Stoffe unter riesiger Vergrößerung anschaut, sehen sie anders aus als mit bloßem Auge ohne Vergrößerung. Ein erstes Beispiel dafür (neben dem Schnee) ein Mosquito, dessen einzelne Körperteile unter dem Mikroskop ganz neue Eindrücke vermitteln:

Beispiel: Ein Mosquito unter dem Mikroskop

Ein zweites Beispiel, daß ein Stoff unter dem Mikroskop anders aussieht als vor bloßem Auge, ist die Vergrößerung eines Stücks Kohle.

Beispiel: Kohle unter dem Mikroskop

Ein ganzer Mosquito unter dem Mikroskop



Ein Teil des Mosquito-flügels, noch einmal vergrößert.



Ein Teil des Mosquito-auges, noch einmal vergrößert.



Ein Teil der Mosquito-antenne, noch einmal vergrößert.



Ein Stück Kohle unter dem Mikroskop. Rechts unten eine Verunreinigung.

Abbildung A.3: Seite 3 des Lernmaterials der Studie 1

Der Aufbau der Stoffe

Wir wissen jetzt, daß zumindest manche Stoffe unter starker Vergrößerung anders aussehen, als unter bloßem Auge. Es ist aber immer noch nicht klar, ob die Stoffe aus kleinsten Einheiten, das heißt kleinsten Teilchen, zusammengesetzt sind oder nicht.

Es gibt also zwei Möglichkeiten:

1. Wenn man sich eine riesige Vergrößerung vorstellt, sieht man, daß alle Stoffe aus kleinsten Einheiten zusammengesetzt sind, die je nach Stoff ganz unterschiedliche Eigenschaften wie Gewicht, Form, Farbe usw. haben.

Beispiel: Vorgestellte kleinste Einheiten

2. Wenn wir uns riesige Vergrößerungen der Stoffe vorstellen, sehen die Stoffe zwar anders aus als vor bloßem Auge, aber wir können immer stärker und stärker vergrößern und sehen dabei in unserer Vorstellung, daß die Stoffe ihr Aussehen je nach Vergrößerung verändern. Zu einem Ende, bei dem die kleinsten Teilchen aller Stoffe sichtbar werden, kommen wir dabei aber nie.

Vorgestellte Bilder ohne kleinste Teilchen

Wir suchen jetzt nach Hinweisen im Verhalten der Stoffe (mit kleinen Experimenten im Labor), um herauszufinden, ob alle Stoffe aus kleinsten Teilchen aufgebaut sind oder nicht. Im folgenden wirst Du zwei einfache Experimente sehen, deren Verlauf Hinweise darauf geben kann, ob Stoffe aus kleinsten Teilchen aufgebaut sind oder nicht.




So könnten in unserer Vorstellung vielleicht kleinste Teilchen von Stoffen aussehen.



So könnte zum Beispiel ein Metall bei einer starken Vergrößerung aussehen.

So könnte dasselbe Metall unter sehr starker Vergrößerung aussehen.

Abbildung A.4: Seite 4 des Lernmaterials der Studie 1

```

(gruppe_1 (obj_gruppe_1) obj_ballspiel_6)
(gruppe_2 (obj_gruppe_2) obj_ballspiel_7)
(haelfte_1 (obj_haelfte_1) obj_ballspiel_8)
(netz (obj_netz) obj_ballspiel_9)
(boden (obj_boden) obj_ballspiel_10)
(decke (obj_decke) obj_ballspiel_11)
(linke_wand (obj_linke_wand) obj_ballspiel_12)
(rechte_wand (obj_rechte_wand) obj_ballspiel_13)
(groessere_maschen (obj_groessere_maschen) obj_ballspiel_14)
(kleinere_maschen (obj_kleinere_maschen) obj_ballspiel_15)
(sportlehrerin (obj_sportlehrerin) obj_ballspiel_16)
(halle (obj_halle) obj_ballspiel_17)
(enthalt (obj_ballspiel obj_groesse_baelle obj_kleine_baelle) ballspiel_1)
(geteilt (klasse obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_2)
(sich_befinden (obj_haelfte1 obj_gruppe1) ballspiel_3)
(sich_befinden (obj_haelfte2 obj_gruppe2) ballspiel_4)
(haben_gleiche_anzahl (obj_baelle obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_5)
(gespannt (obj_netz obj_halle) ballspiel_6)
(reicht (obj_netz obj_boden obj_decke obj_linke_wand obj_rechte_wand) ballspiel_7)
(enthalt (obj_netz obj_groessere_maschen obj_kleinere_maschen) ballspiel_8)
(starten (obj_sportlehrerin ballspiel_10) ballspiel_9)
(faengt_an (obj_gruppe obj_ballspiel) ballspiel_10)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_1 obj_baelle obj_netz) ballspiel_11)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_2 obj_baelle obj_netz) ballspiel_12)
(hat_aufgabe (obj_gruppe1 ballspiel_13) ballspiel_13)
(hat_aufgabe (obj_gruppe2 ballspiel_14) ballspiel_14)
(treffen_sich (obj_baelle) ballspiel_15)
(fliegen_kreuz_und_quer (obj_baelle) ballspiel_16)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_15 ballspiel_16) ballspiel_17)
(hindurch_passen (obj_kleine_baelle obj_kleinere_maschen) ballspiel_18)
(durchqueren (obj_kleine_baelle obj_netz) ballspiel_19)
(nicht_hindurch_passen (obj_grosse_baelle obj_groessere_maschen) ballspiel_20)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_21)
(abprallen (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_22)
(zurueck_fliegen_aus (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_23)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_17 ballspiel_18) ballspiel_24)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_20 ballspiel_21) ballspiel_25)
(beendet_spiel (obj_sportlehrerin obj_ballspiel) ballspiel_26)
(zaehlen (obj_alle_personen obj_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ballspiel_27)
(entscheiden (obj_alle_personen obj_mehr_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ballspiel_28)
) ) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'brownsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
(
(objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)

```

```
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_broecken obj_tusche) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)
) ) )
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung")
  (similar 'fliegen_kreuz_und_quer 'zittern.2)
  (similar 'baelle 'tinten_broeckchen.2)
  (similar 'bestehen_aus 'geteilt.2)
  (constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'makroskopisches_ball_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)
```

Ergebnis des ACME-Laufs

```
Network has settled by cycle 96.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 97
makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 3.1585796
Calculating the best mappings after 97 cycles.
est mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.89271116
Best mapping of ZITTERN is FLIEGEN_KREUZ_UND_QUER. 0.7544706
Best mapping of EINSETZEN is NICHT_HINDURCH_PASSEN. 0.57498986
Best mapping of TUPFEN is FAENGT_AN. 0.68653476
Best mapping of MISCHEN is GETEILT. 0.627181
Best mapping of BESTEHEN_AUS is SICH_BEFINDEN. 0.7156795
Best mapping of MIKROSKOP is GROESSERE_MASCHEN. 0.54888827
Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is BAELLE. 0.54925746
Best mapping of WASSER is HALLE. -1.5761642E-6
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with KLEINERE_MASCHEN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
tied with NETZ.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with KLEINE_BAELLE.
tied with GROSSE_BAELLE.
Best mapping of TUSCHE is HALLE. -1.5761642E-6
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with KLEINERE_MASCHEN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
```

tied with NETZ.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with KLEINE_BAELLE.
tied with GROSSE_BAELLE.
Best mapping of OBJEKTTRAEGER is BALLSPIEL. 0.5436554
Best mapping of BROWN_7 is BALLSPIEL_25. 0.40412778
Mapping with BALLSPIEL_17 is also possible: 0.33340377
Mapping with BALLSPIEL_24 is also possible: 0.25892735
Best mapping of BROWN_5 is BALLSPIEL_3. 0.68354887
Best mapping of BROWN_1 is BALLSPIEL_4. 0.4115118
Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_BALLSPIEL_14. 0.54888827
Best mapping of OBJ_BROWN_4 is OBJ_BALLSPIEL_3. 0.54925746
Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_BALLSPIEL_17. -1.5761642E-6
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_15.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_9.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_5.
tied with OBJ_BALLSPIEL_4.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_BALLSPIEL_17. -1.5761642E-6
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_15.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_9.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_5.
tied with OBJ_BALLSPIEL_4.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_BALLSPIEL_2. 0.5436554
Best mapping of BROWN_2 is BALLSPIEL_9. 0.79562426
Mapping with BALLSPIEL_2 is also possible: 0.23880468
Best mapping of BROWN_3 is BALLSPIEL_10. 0.90165454
Best mapping of BROWN_4 is BALLSPIEL_20. 0.57360303
Mapping with BALLSPIEL_15 is also possible: 0.37053847
Best mapping of BROWN_6 is BALLSPIEL_16. 0.5264917
Mapping with BALLSPIEL_18 is also possible: 0.20664166
Mapping with BALLSPIEL_21 is also possible: 0.34475887
Best mapping of OBJ_BROECKEN is OBJ_HAELFTE1. 0.68354887
Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_GRUPPE. 0.68653476
Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_GRUPPE2. 0.76083255
Best mapping of OBJ_MIKROSKOP is OBJ_GROESSERE_MASCHEN. 0.69560593
Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_BAELLE. 0.6970288
Best mapping of OBJ_WASSER is KLASSE. 0.7034408
Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_GRUPPE1. 0.8318791

Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_BALLSPIEL. 0.67384595

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Prätetaufgabe

Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```
; FILE: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; PURPOSE: test der explanatory coherence der Diffusionsaufgabe nach Lesen der Ballgeschichte
; PROGRAMMER: Michael Rohr
; CREATED: 23.12.2003
; *****
;
; (defaults 'echo)
; *****
; (defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
; (setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
; (clear-net)
; *****
;
; Geschichte
; (proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde fängt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.") ;
; (proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Bälle") ;
; (proposition 'g1_3 "Die Bälle sind gross oder klein.") ;
; (proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.")
; (proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Hälfte der Sporthalle.") ;
; (proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Hälfte der Sporthalle.") ;
; (proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bällen.
; ")
; (proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
; (proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
; (proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
; (proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
; (proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige grösser und viele kleiner.") ;
; (proposition 'g1_13 "Die grösseren Maschen sind gerade so gross wie die grössten Bälle.")
; (proposition 'g1_14 "Die grössten Bälle passen nicht durch die grössten Maschen.")
; (proposition 'g1_15 "Die kleineren Bälle passen durch die grössten Maschen.")
; (proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
; (proposition 'g1_17 "Die kleineren Bälle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
; (proposition 'g1_18 "Die grösseren Bälle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
; (proposition 'g1_19 "Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Baele wie moeglich
; durch das Netz in die Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
; (proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
; (proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baele zum Netz.") ;
; (proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baele.") ;
; (proposition 'g1_23 "Die Baele fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
; (proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baele passen durch die Maschen.")
; (proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baele passen nirgendwo hindurch.")
; (proposition 'g1_26 "Die kleinen Baele fliegen durch das Netz.")
; (proposition 'g1_27 "Die groesseren Baele durchqueren das Netz nicht.")
; (proposition 'g1_28 "Die kleinen Baele fliegen fast immer in das Netz.")
; (proposition 'g1_29 "Die grossen Baele werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
; (proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;
; (proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baele in die Haelfte
; der anderen befoerdert hat.") ;
; *****
; Diffusionsexperiment
```

```
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas werden einige Tropfen Tusche mit etwa 10-mal
soviel Wasser gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.") ;
(proposition 'exp_brown_3 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_4 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit derdurch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_6 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_8 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;
,*****
; Erklarungszusammenhaenge in der Ballspielgeschichte:
; Die Erklarungszusammenhaenge enthalten in beiden Analoga viele Explanans-Aussagen, die
jeweils
; ein Explanandum erklaren. Annahme: Das entspricht eher der Alltagsargumentation. Ansonsten
entsteht das Problem
; den Aufloesungsgrad der Erklarungsketten festzulegen und in der Folge das Problem, nur noch
Erklaerungsanaloga genau auf
; diesen Erklarungsketten festlegen zu koennen. Damit sind kaum mehr Analoga für die konkreten
Datensatze der Linkenheimstudie
; formulierbar.
; 1. Zwei Erklärungen, warum grosse Baele zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_24) 'g1_26)
(explain '(g1_20 g1_21 g1_25) 'g1_27)
; 2. Erklärung, warum die Baele kreuz und quer fliegen.
(explain '(g1_15 g1_16 g1_17) 'g1_18)
,*****
; Erklarung im Brownschen Experiment
; Wiederum eine Erklarung, die die Beobachtung auf den experimentellen Aufbau zurueckfuehrt.
; Siehe entsprechendes Verstaendnis kausaler Zusammenhaenge.
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_8)
,*****
; Analogien
; Die Analogie wurde durch den ACME zur Analogiebildung zwischen Experiment und Geschichte
bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_15 exp_brown_1) '(g1_18 exp_brown_8) )
(analogous '(g1_16 exp_brown_2) '(g1_18 exp_brown_8) )
(analogous '(g1_17 exp_brown_3) '(g1_18 exp_brown_8) )
(data '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3 exp_brown_4 exp_brown_5 exp_brown_6 exp_brown_7
exp_brown_8))
(gross_on)
(run_exp)
Ergebnis des ECHO-Laufs
Network has settled by cycle 63.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 64
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 0.465576
Total times: 64
EXP_BROWN_1 has activation: 0.727521
```

EXP_BROWN_2 has activation: 0.7604323
EXP_BROWN_3 has activation: 0.7604323
EXP_BROWN_4 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_5 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_6 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_7 has activation: 0.65998024
EXP_BROWN_8 has activation: 0.795233
G1_1 has activation: 3.752411E-4
G1_10 has activation: 3.752411E-4
G1_11 has activation: 3.752411E-4
G1_12 has activation: 3.752411E-4
G1_13 has activation: 3.752411E-4
G1_14 has activation: 3.752411E-4
G1_15 has activation: 3.752411E-4
G1_16 has activation: 0.5541164
G1_17 has activation: 0.5541164
G1_18 has activation: 0.66761833
G1_19 has activation: 3.752411E-4
G1_2 has activation: 3.752411E-4
G1_20 has activation: 0.04692276
G1_21 has activation: 0.04692276
G1_22 has activation: 3.752411E-4
G1_23 has activation: 3.752411E-4
G1_24 has activation: 0.028202198
G1_25 has activation: 0.028202198
G1_26 has activation: 0.028202198
G1_27 has activation: 0.028202198
G1_28 has activation: 3.752411E-4
G1_29 has activation: 3.752411E-4
G1_3 has activation: 3.752411E-4
G1_30 has activation: 3.752411E-4
G1_31 has activation: 3.752411E-4
G1_4 has activation: 3.752411E-4
G1_5 has activation: 3.752411E-4
G1_6 has activation: 3.752411E-4
G1_7 has activation: 3.752411E-4
G1_8 has activation: 3.752411E-4
G1_9 has activation: 3.752411E-4

ACME-Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Ballgeschichte und erfolgreicher Simulation der Brownschen Bewegung in der Lernphase

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-brown-ball-simulation.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
;problem 1: Simulation
(defun make_struc1 ()
  (make_struc 'erfolgreiches_simulations_modell
    'sentence
    '(all
      (
        ; Objekte des makroskopischen Versuchs der Brownschen Bewegung von Zigarettenrauchpartikeln
        (rauchkammer (obj_rauchkammer) obj_brown_sim_1)
        (zigarettenrauch (obj_zigarettenrauch) obj_brown_sim_2)
        (luft (obj_luft) obj_brown_sim_3)
        (zigarettenrauch_broeckchen (obj_zigarettenrauch_broeckchen) obj_brown_sim_4)
```

```

; Objekte der Simulation
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_brown_sim_5)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_brown_sim_6)
(simulationsfeld (obj_simulationsfeld) obj_brown_sim_7)
(simulation (obj_simulation) obj_brown_sim_8)
(teilchen (obj_teilchen) obj_brown_sim_9)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_brown_sim_10)
; Propositionen für das Experiment
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) rauch_brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) rauch_brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) rauch_brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) rauch_brown_4)
(bestehen_aus (obj_broeckchen obj_tusche) rauch_brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) rauch_brown_6)
(verursachen (rauch_brown_2 rauch_brown_3 rauch_brown_4 rauch_brown_6) rauch_brown_7)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind und direkte Implika-
tionen
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) brown_sim_1)
(ist_ein (obj_zigarettenrauch obj_stoff) brown_sim_2)
(ist_ein (obj_luft obj_stoff) brown_sim_3)
(dargestellt_als (rauch_brown_6 brown_sim_12) brown_sim_3a)
; Propositionen der Erklärung durch die Simulation
(stattfinden (obj_simulation obj_simulationsfeld) brown_sim_4)
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_5)
(dargestellt_als (obj_zigarettenrauch_broeckchen obj_grosse_teilchen) brown_sim_6)
(dargestellt_als (obj_luft obj_kleine_teilchen) brown_sim_8)
(starten (obj_selbst obj_simulation) brown_sim_9)
(bewegen_sich (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_10)
(kollidieren (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_11)
(aendern_bewegungsrichtung (obj_grosse_teilchen) brown_sim_12)
(zittern (obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_13)
(beenden (obj_selbst obj_brown_simulation) brown_sim_15)
(verursachen (brown_sim_5 brown_sim_6) brown_sim_16)
(verursachen (brown_sim_6 brown_sim_7) brown_sim_17)
(verursachen (brown_sim_7 brown_sim_8) brown_sim_18)
) ) ) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'brownsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
(
(objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)

```

```
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6)      brown_7)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff)      obj_brown_6)
(teilchen (obj_teilchen)      obj_brown_modell_1)
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen)      obj_brown_modell_2)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen)      obj_brown_modell_3)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters nach dem Arbeiten mit der Model-
lierungsumgebung übertragen worden sind
; Ohne diese einfachen Übertragungen bzw. ohne dass die SchülerIn bemerkt, dass die Aussagen
auch für die Testaufgabe gelten,
; kann ACME keine Analogien zwischen den beiden Fällen feststellen und damit letztlich ECHO
die analoge Problemlösung auch nicht nutzen.
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen)      brown_modell_1)
(ist_ein (obj_tusche obj_stoff)      brown_modell_2)
(ist_ein (obj_wasser obj_stoff)      brown_modell_3)
(dargestellt_als (obj_tusche_broeckchen obj_grosse_teilchen)      brown_modell_4)
(dargestellt_als (obj_wasser obj_kleine_teilchen)      brown_modell_5)
(zittern (obj_grosse_teilchen)      brown_modell_6)
(dargestellt_als (brown_6 brown_modell_6)      brown_modell_7)
) ) )
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung")
  (similar 'aendern_bewegungsrichtung 'zittern.9)
  (constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'erfolgreiches_simulations_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)
```

Ergebnis des ACME-Laufs

```
Network has settled by cycle 63.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 64
makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 7.799699
Calculating the best mappings after 64 cycles.
Best mapping of IST_EIN is IST_EIN. 0.87591064
Best mapping of DARGESTELLT_ALS is DARGESTELLT_ALS. 0.90378344
Best mapping of KLEINE_TEILCHEN is KLEINE_TEILCHEN. 0.6951015
Best mapping of GROSSE_TEILCHEN is GROSSE_TEILCHEN. 0.7011317
Best mapping of TEILCHEN is TEILCHEN. 0.69577986
Best mapping of STOFF is STOFF. 0.7073899
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.8307264
Best mapping of ZITTERN is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. 0.8417634
Best mapping of EINSETZEN is EINSETZEN. 0.7631476
Best mapping of TUPFEN is TUPFEN. 0.7631476
Best mapping of MISCHEN is MISCHEN. 0.72673744
Best mapping of BESTEHEN_AUS is BESTEHEN_AUS. 0.89457434
Best mapping of MIKROSKOP is SIMULATION. -4.226994E-5
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with RAUCHKAMMER.
```

Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.5955574
 Best mapping of WASSER is LUFT. 0.5655719
 Best mapping of TUSCHE is ZIGARETTENRAUCH. 0.5891523
 Best mapping of OBJEKTTRAEGER is SIMULATION. -4.226994E-5
 tied with SIMULATIONSFELD.
 tied with RAUCHKAMMER.
 Best mapping of BROWN_MODELL_7 is BROWN_SIM_3A. 0.7123003
 Best mapping of BROWN_MODELL_5 is BROWN_SIM_8. 0.702899
 Best mapping of BROWN_MODELL_4 is BROWN_SIM_6. 0.71918994
 Best mapping of BROWN_MODELL_3 is BROWN_SIM_3. 0.71075803
 Best mapping of BROWN_MODELL_2 is BROWN_SIM_2. 0.71942896
 Best mapping of BROWN_MODELL_1 is BROWN_SIM_1. 0.714252
 Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_3 is OBJ_BROWN_SIM_6. 0.58960843
 Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_2 is OBJ_BROWN_SIM_5. 0.5999784
 Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_1 is OBJ_BROWN_SIM_9. 0.5907787
 Best mapping of OBJ_BROWN_6 is OBJ_BROWN_SIM_10. 0.6106593
 Best mapping of BROWN_7 is RAUCH_BROWN_7. 0.80160236
 Best mapping of BROWN_5 is BROWN_SIM_5. 0.30080003
 tied with RAUCH_BROWN_1.
 Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.30080003
 Best mapping of BROWN_1 is BROWN_SIM_5. 0.30080003
 tied with RAUCH_BROWN_1.
 Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.30080003
 Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_BROWN_SIM_8. -4.809222E-5
 tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
 tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
 Best mapping of OBJ_BROWN_4 is OBJ_BROWN_SIM_4. 0.595554
 Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_BROWN_SIM_3. 0.5655719
 Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_BROWN_SIM_2. 0.5891523
 Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_BROWN_SIM_8. -4.809222E-5
 tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
 tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
 Best mapping of BROWN_MODELL_6 is BROWN_SIM_12. 0.79807204
 Best mapping of OBJ_KLEINE_TEILCHEN is OBJ_KLEINE_TEILCHEN. 0.77748024
 Best mapping of OBJ_GROSSE_TEILCHEN is OBJ_GROSSE_TEILCHEN. 0.8371903
 Best mapping of OBJ_TEILCHEN is OBJ_TEILCHEN. 0.7840501
 Best mapping of OBJ_STOFF is OBJ_STOFF. 0.9024016
 Best mapping of BROWN_2 is RAUCH_BROWN_2. 0.84573203
 Best mapping of BROWN_3 is RAUCH_BROWN_3. 0.85761917
 Best mapping of BROWN_4 is RAUCH_BROWN_4. 0.85761917
 Best mapping of BROWN_6 is RAUCH_BROWN_6. 0.8631481
 Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_MISCHUNG. 0.7018235
 Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_GLAS. 0.64313126
 Best mapping of OBJ_MIKROSKOP is OBJ_MIKROSKOP. 0.7018235
 Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.91472703
 Best mapping of OBJ_WASSER is OBJ_LUFT. 0.7669981
 Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_ZIGARETTENRAUCH. 0.8806156
 Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_OBJEKTTRAEGER. 0.81462914

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Prätetaufgabe
Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```
; datei: echo-brown-ballgeschichte-nach-simulation
; autor: Michael Rohr
; *****
(defaults 'echo')
; *****
;(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
```

```

;(setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
;(clear-net)
;*****
; Geschichte
(proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde faengt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.") ;
(proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Baelle") ;
(proposition 'g1_3 "Die Baelle sind gross oder klein.") ;
(proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.") ;
(proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Haelfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Haelfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bae?llen.
") ;
(proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
(proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
(proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
(proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
(proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige groesser und viele kleiner.") ;
(proposition 'g1_13 "Die groesseren Maschen sind gerade so gross wie die groessten Balle.")
(proposition 'g1_14 "Die groessten Baelle passen nicht durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_15 "Die kleineren Baelle passen durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
(proposition 'g1_17 "Die kleineren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_18 "Die groesseren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_19 "Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Baelle wie moeglich
durch das Netz in die Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
(proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
(proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baelle zum Netz.") ;
(proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baelle.") ;
(proposition 'g1_23 "Die Baelle fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
(proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baelle passen durch die Maschen.")
(proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baelle passen nirgendwo hindurch.")
(proposition 'g1_26 "Die kleinen Baelle fliegen durch das Netz.")
(proposition 'g1_27 "Die groesseren Baelle durchqueren das Netz nicht.")
(proposition 'g1_28 "Die kleinen Baelle fliegen fast immer in das Netz.")
(proposition 'g1_29 "Die grossen Baelle werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
(proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;
(proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baelle in die Haelfte
der anderen befoerdert hat.") ;
;*****
; Experiment zur Brownschen Bewegung von Tusche in Wasser
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas wird etwas Wasser gegeben.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Unter das Wasser werden ein paar Tropfen Tusche gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_3 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.") ;
(proposition 'exp_brown_4 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit der durch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann.") ;
(proposition 'exp_brown_6 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_8 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_9 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;

```

```

; Zusätzlicher Teil, der nach einer erfolgreichen Analogiebildung zwischen Test-Experiment und
Simulationsexperiment als neu gelernt angenommen wird.
(proposition 'exp_brown_10 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilche.");
(proposition 'exp_brown_11 "Tusche ist ein Stoff.");
(proposition 'exp_brown_12 "Wasser ist ein Stoff.");
(proposition 'exp_brown_13 "Tuschebröckchen werden als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'exp_brown_14 "Wasser wird als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'exp_brown_15 "Das Zittern der Tuschebröckchen wird als Bewegungsveränderung der
Tuschebröckchenteilchen dargestellt.");
; Erfolgreiche Simulation
(proposition 'simulation_1 "Die Simulation findet auf einem Simulationsfeld statt.");
(proposition 'simulation_2 "Es werden grosse Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt");
(proposition 'simulation_3 "Es werden kleine Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt");
(proposition 'simulation_4 "Ich starte die Simulation.");
(proposition 'simulation_5 "Die Kugeln bewegen sich nach dem Start der Simulation.");
(proposition 'simulation_6 "Die Kugeln prallen ab und zu aufeinander.");
(proposition 'simulation_7 "Die grossen Kugeln aendern dann ihre Bewegungsrichtung.");
(proposition 'simulation_8 "Ich beende die Simulation. ");
; Makroskopische Beschreibung des Experiments der Lernphase
(proposition 'simulation_9 "Luft befindet sich in einer Rauchkammer.");
(proposition 'simulation_10 "Zigarettenrauch befindet sich in einer Rauchkammer.");
(proposition 'simulation_11 "Die Rauchkammer wird unter ein Mikroskop gespannt.");
(proposition 'simulation_12 "Die Rauchkammer wird durch einen Spalt mit Licht bestrahlt.");
(proposition 'simulation_13 "Die Zigarettenrauchbroeckchen zittern unter dem Mikroskop.");
; Beschreibung der Modellbeziehung zwischen Simulation und dazugehörigen Experiment
(proposition 'simulation_14 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen.");
(proposition 'simulation_15 "Zigarettenrauch ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_16 "Luft ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_17 "Zigarettenrauch besteht aus Zigarettenrauchbroeckchen.");
(proposition 'simulation_18 "Das Zittern der Zigarettenrauchbröckchen wird als Richtungsverän-
derung der Teilchen des Zigarettenrauchs dargestellt.");
,*****
; Erklärungszusammenhänge in der Geschichte
; 1. Erklärung, warum die Baele kreuz und quer fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_22) 'g1_23)
,*****
; Erklärungs-zusammenhänge im Experiment in der Simulationsphase
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe
(explain '(simulation_14 simulation_15 simulation_17) 'simulation_2)
(explain '(simulation_14 simulation_16) 'simulation_3)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Zigarettenbröckchen
(explain '(simulation_7) 'simulation_13)
; 2. Makroskopische Erklärung der Beobachtung im Experiment: analog der makroskopischen Er-
klärung des Posttestexperiments
(explain '(simulation_9 simulation_10 simulation_11) 'simulation_13)
,*****
; Erklärungs-zusammenhänge der erfolgreichen Konstruktion des Zitterns der grossen Kugeln
; Erklärungskette, warum die Baele in der Simulation kreuz und quer fliegen.
(explain '(simulation_2 simulation_3 simulation_4) 'simulation_5)
(explain '(simulation_5) 'simulation_6)
(explain '(simulation_6) 'simulation_7)
,*****
; Erklärung im Posttest-Experiment zur Brownschen Bewegung
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe

```

```
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_11 exp_brown_13) 'exp_brown_14)
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_12) 'exp_brown_15)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Tuschebröckchen
(explain '(exp_brown_15) 'exp_brown_9)
; Wie beim Experiment zur Simulation eine makroskopische Erklärung, die die Beobachtung auf
den experimentellen Aufbau zurueckfuehrt.
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_9)
;*****
;
Analogien
; Analogien zwischen Geschichte und Prä-/Posttest-Experiment
; Die Analogie wurde durch den ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen Experiment und Ge-
schichte bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_15 exp_brown_1) '(g1_18 exp_brown_9) )
(analogous '(g1_16 exp_brown_2) '(g1_18 exp_brown_9) )
(analogous '(g1_17 exp_brown_3) '(g1_18 exp_brown_9) )
;*****
; Erklärungsanalogien zwischen Test-Experiment und Lernphasen-Experiment
; 1. Modellbeziehungen
; a. Tuschebröckchen vs. Zigarettenrauchbröckchen
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_15 exp_brown_11) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_17 exp_brown_13) '(simulation_2 exp_brown_14) )
; b. Wasser vs. Luft
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_3 exp_brown_15) )
(analogous '(simulation_16 exp_brown_12) '(simulation_3 exp_brown_15) )
; Entsprechend gilt es für das Erklärungsziel, das Zittern der Tusche-, bzw. Zigarettenrauchteilchen
(analogous '(simulation_7 exp_brown_15) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 2. Makroskopische Erklärungen sind teilweise ebenfalls analog
(analogous '(simulation_9 exp_brown_1) '(simulation_13 exp_brown_9) )
(analogous '(simulation_10 exp_brown_2) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 3. Disanalogie
; Die Erklärung der Ballbewegung in der Geschichte ist eine andere als die Erklärung der Teil-
chenbewegung in der Simulation
;(disanalogous '(simulation_4 g1_21) '(simulation_5 g1_23) )
;*****
;(data '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3 exp_brown_4 exp_brown_5 exp_brown_6 exp_brown_7
exp_brown_8 exp_brown_9
simulation_9 simulation_10 simulation_11 simulation_12 simulation_13))
(gross_on)
(wtp '(500))
(run_exp)
```

Ergebnis des ECHO-Laufs

```
Network has settled by cycle 83.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 84
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 1.3392367
Total times: 84
EXP_BROWN_1 has activation: 0.77274185
EXP_BROWN_10 has activation: 0.72215825
EXP_BROWN_11 has activation: 0.5312406
EXP_BROWN_12 has activation: 0.55701584
EXP_BROWN_13 has activation: 0.5312406
```

EXP_BROWN_14 has activation: 0.73426366
EXP_BROWN_15 has activation: 0.775408
EXP_BROWN_2 has activation: 0.77274185
EXP_BROWN_3 has activation: 0.7293732
EXP_BROWN_4 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_5 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_6 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_7 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_8 has activation: 0.65999925
EXP_BROWN_9 has activation: 0.8501362
G1_1 has activation: 1.3451863E-4
G1_10 has activation: 1.3451863E-4
G1_11 has activation: 1.3451863E-4
G1_12 has activation: 1.3451863E-4
G1_13 has activation: 1.3451863E-4
G1_14 has activation: 1.3451863E-4
G1_15 has activation: 1.3451863E-4
G1_16 has activation: 1.3451863E-4
G1_17 has activation: 1.3451863E-4
G1_18 has activation: 1.3451863E-4
G1_19 has activation: 1.3451863E-4
G1_2 has activation: 1.3451863E-4
G1_20 has activation: 0.009209339
G1_21 has activation: 0.009209339
G1_22 has activation: 0.009209339
G1_23 has activation: 0.009209339
G1_24 has activation: 1.3451863E-4
G1_25 has activation: 1.3451863E-4
G1_26 has activation: 1.3451863E-4
G1_27 has activation: 1.3451863E-4
G1_28 has activation: 1.3451863E-4
G1_29 has activation: 1.3451863E-4
G1_3 has activation: 1.3451863E-4
G1_30 has activation: 1.3451863E-4
G1_31 has activation: 1.3451863E-4
G1_4 has activation: 1.3451863E-4
G1_5 has activation: 1.3451863E-4
G1_6 has activation: 1.3451863E-4
G1_7 has activation: 1.3451863E-4
G1_8 has activation: 1.3451863E-4
G1_9 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_1 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_10 has activation: 0.7727122
SIMULATION_11 has activation: 0.72932875
SIMULATION_12 has activation: 0.65999925
SIMULATION_13 has activation: 0.8482613
SIMULATION_14 has activation: 0.721066
SIMULATION_15 has activation: 0.53291047
SIMULATION_16 has activation: 0.5527648
SIMULATION_17 has activation: 0.53291047
SIMULATION_18 has activation: 1.3451863E-4
SIMULATION_2 has activation: 0.7617189
SIMULATION_3 has activation: 0.7253881
SIMULATION_4 has activation: 0.39116886
SIMULATION_5 has activation: 0.52815723
SIMULATION_6 has activation: 0.5375892
SIMULATION_7 has activation: 0.6763305
SIMULATION_8 has activation: 1.3451863E-4

SIMULATION_9 has activation: 0.7727122

A.2.1.2 Gruppe, die die Fischereigeschichte las

ACME- Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Fischgeschichte und Experiment zur Brownschen Bewegung des Prätests

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-brown-fisch-prae.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
;problem 1: Fischgeschichte als Analogie für beide Testaufgaben
(defun make_struct ()
  (make_struct 'makroskopisches_fisch_modell
    'sentence
    '(all
      (
        (see (obj_see) obj_fischen_1)
        (morgen (obj_morgen) obj_fischen_2)
        (fischerboot (obj_fischerboot) obj_fischen_3)
        (fische (obj_fische) obj_fischen_4)
        (grosse_fische (obj_grosse_fische) obj_fischen_5)
        (kleine_fische (obj_kleine_fische) obj_fischen_6)
        (karpfen (obj_karpfen) obj_fischen_7)
        (rotaugen (obj_rotaugen) obj_fischen_8)
        (fischerin (obj_fischerin) obj_fischen_9)
        (netz (obj_netz) obj_fischen_10)
        (maschen (obj_maschen) obj_fischen_11)
        (kleine_fische (obj_kleine_fische) obj_fischen_12)
        (bitterling (obj_bitterling) obj_fischen_13)
        (stichling (obj_stichling) obj_fischen_14)
        (land (obj_land) obj_fischen_15)
        (fischhaendler (obj_fischhaendler) obj_fischen_16)
        (fahren (obj_fischerboot obj_see) fischen_1)
        (tageszeit (obj_morgen) fischen_2)
        (ziel (obj_fischerboot obj_fische) fischen_3)
        (fangen_wollen (obj_fischerin obj_grosse_fische) fischen_4)
        (beispiel_grosse_fische (obj_karpfen obj_rotaugen) fischen_6)
        (legen (obj_fischerin obj_netz) fischen_7)
        (schwimmen (obj_fische obj_netz) fischen_8)
        (enthalten (obj_netz obj_maschen) fischen_9)
        (nicht_durchpassen (obj_grosse_fische obj_maschen) fischen_10)
        (nicht_entkommen (obj_grosse_fische obj_netz) fischen_11)
        (gefangen_bleiben (obj_karpfen) fischen_12)
        (beispiel_kleine_fische (obj_bitterling obj_stichling) fischen_13)
        (durchpassen (obj_kleine_fische obj_maschen) fischen_14)
        (entkommen (obj_kleine_fische obj_netz) fischen_15)
        (verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_13 fischen_14) fischen_16)
        (verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_10 fischen_11) fischen_17)
        (kollidieren (obj_karpfen) fischen_18)
        (aendern_bewegungsrichtung (obj_karpfen) fischen_19)
        (verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_18 fischen_19) fischen_20)
        (prallen (obj_karpfen obj_netz) fischen_21)
        (einziehen (obj_fischerin obj_netz) fischen_22)
```

```
(fahren (obj_boot obj_land) fischen_23)
(bringen (obj_fischerin obj_grosse_fische obj_fischhaendler) fischen_24)
(verkaufen (obj_fischerin obj_grosse_fische) fischen_25)
) ) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'brownsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
(
(objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_broecken obj_tusche) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)
) ) )
(defun acme ()
(clear_net)
(make_struc1)
(make_struc2)
(setq experiment "makroskopisches_fischmodell_brownsche-bewegung")
(similar 'zittern 'aendern_bewegungsrichtung.2)
(constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'makroskopisches_fisch_modell)
(acme-mode)
(wtp '(500))
(run_hyp_net 'acme)
)
(acme)
```

Ergebnis des ACME-Laufs

```
Network has settled by cycle 99.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 100
makroskopisches_fischmodell_brownsche-bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 3.1375704
Calculating the best mappings after 100 cycles.
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.8933033
Best mapping of ZITTERN is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. 0.75494146
Best mapping of EINSETZEN is ENTHALTEN. 0.60518616
Best mapping of TUPFEN is SCHWIMMEN. 0.70087755
Best mapping of MISCHEN is BRINGEN. 0.6835875
Best mapping of BESTEHEN_AUS is VERKAUFEN. 0.29285425
tied with FANGEN_WOLLEN.
Mapping with FANGEN_WOLLEN is also possible: 0.29285425
Best mapping of MIKROSKOP is MASCHEN. 0.55956596
Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is GEFANGEN_BLEIBEN. 0.20360966
tied with KARPFFEN.
Mapping with KARPFFEN is also possible: 0.20360966
```

Best mapping of WASSER is FISCHERIN. 0.4954381
 Best mapping of TUSCHE is GROSSE_FISCHE. 0.5799169
 Best mapping of OBJEKTTRAEGER is NETZ. 0.57694054
 Best mapping of BROWN_7 is FISCHEN_20. 0.3851023
 Mapping with FISCHEN_16 is also possible: 0.3153746
 Mapping with FISCHEN_17 is also possible: 0.31826624
 Best mapping of BROWN_5 is FISCHEN_25. 0.29285425
 tied with FISCHEN_4.
 Mapping with FISCHEN_4 is also possible: 0.29285425
 Best mapping of BROWN_1 is FISCHEN_11. 0.20578368
 Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_FISCHEN_11. 0.55956596
 Best mapping of OBJ_BROWN_4 is FISCHEN_12. 0.20360966
 tied with OBJ_FISCHEN_7.
 Mapping with OBJ_FISCHEN_7 is also possible: 0.20360966
 Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_FISCHEN_9. 0.4954381
 Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_FISCHEN_5. 0.5799169
 Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_FISCHEN_10. 0.57694054
 Best mapping of BROWN_2 is FISCHEN_7. 0.80887955
 Mapping with FISCHEN_24 is also possible: 0.2032372
 Best mapping of BROWN_3 is FISCHEN_8. 0.9034561
 Best mapping of BROWN_4 is FISCHEN_10. 0.40949762
 Mapping with FISCHEN_13 is also possible: 0.28597623
 Mapping with FISCHEN_18 is also possible: 0.35400784
 Best mapping of BROWN_6 is FISCHEN_19. 0.5586128
 Mapping with FISCHEN_14 is also possible: 0.2985575
 Best mapping of OBJ_BROECKEN is OBJ_FISCHERIN. 0.3703161
 Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_FISCHE. 0.70087755
 Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_FISCHHAENDLER. 0.68358755
 Best mapping of OBJ_MKROSKOP is OBJ_MASCHEN. 0.7404009
 Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_KARPFEN. 0.67344975
 Best mapping of OBJ_WASSER is OBJ_FISCHERIN. 0.511352
 Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_GROSSE_FISCHE. 0.834308
 Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_NETZ. 0.81981385

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Prätestaufgabe
Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```
; autor: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; autor: Michael Rohr
; *****
;
; (defaults 'echo)
; *****
;
; (defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
; (setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
; (clear-net)
; *****
; Geschichte
; (proposition 'g2_1 "Ein Boot fährt auf den See hinaus.") ;
; (proposition 'g2_2 "Es ist früher Morgen.")
; (proposition 'g2_3 "Das Boot fährt zum Fischen.") ;
; (proposition 'g2_4 "Die Fischerin will grosse Fische fangen.") ;
; (proposition 'g2_5 "Grosse Fische sind zum Beispiel Karpfen und Rotaugen.") ;
; (proposition 'g2_6 "Sie legt ein Netz.")
; (proposition 'g2_7 "Das Netz hat Maschen.")
; (proposition 'g2_7a "Die Fische schwimmen in das Netz.")
; (proposition 'g2_8 "Die Maschen sind kleiner als die Karpfen.") ;
```

```
(proposition 'g2_9 "Wenn die Karpfen in das Netz geraten, können sie deshalb mehr nicht durch
die Maschen hindurch ins freie Wasser entkommen.")
(proposition 'g2_10 "Die Karpfen bleiben gefangen.") ;
(proposition 'g2_11 "In der Enge prallen sie gegeneinander.") ;
(proposition 'g2_12 "Sie ändern dabei immer wieder ihre Schwimmrichtung.") ;
(proposition 'g2_13 "Aber es gibt auch noch kleine Fische im See.")
(proposition 'g2_14 "Kleine Fischen sind zum Beispiel Bitterlinge und Stichlinge.")
(proposition 'g2_15 "Diese kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_16 "Sie entkommen wieder in den See.") ;
(proposition 'g2_17 "Die Fischerin zieht das Netz langsam enger..")
(proposition 'g2_18 "Die kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_19 "Die kleinen Fische entkommen in den See.")
(proposition 'g2_20 "Schliesslich zieht die Fischerin das Netz ein.")
(proposition 'g2_21 "Sie steuert das Boot wieder an Land.") ;
(proposition 'g2_22 "Gegen Mittag bringt die Fischerin ihren Fang zu den Fischhändlern.") ;
(proposition 'g2_23 "Sie verkauft die Karpfen.") ;
;*****
; Experiment
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas werden einige Tropfen Tusche mit etwa 10-mal
soviel Wasser gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.") ;
(proposition 'exp_brown_3 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_4 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit der durch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_6 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_8 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;
;*****
; 1. Zwei Erklärungen, warum grosse Fische zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_7a g2_15) 'g2_16)
(explain '(g2_6 g2_7a g2_8) 'g2_10)
; 2. Erklärung, warum die grossen Fischen im Netz hin und her schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_7a g2_11) 'g2_12)
;*****
; Erklarung im Experiment zur Brownschen Bewegung
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_8)
;*****
; Analogien
;1. Zwischen Experiment und Geschichte: Die Analogie wurde durch den ACME zur Analogiebil-
dung zwischen Experiment und Geschichte bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g2_6 exp_brown_1) '(g2_12 exp_brown_8) )
(analogous '(g2_7a exp_brown_2) '(g2_12 exp_brown_8) )
(analogous '(g2_11 exp_brown_3) '(g2_12 exp_brown_8) )
(data '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5 exp_diffusion_7
exp_diffusion_7 exp_diffusion_8 exp_diffusion_9 exp_diffusion_10 exp_diffusion_11))
(gross_on)
(run_exp)
```

Ergebnis des ECHO-Laufs

Network has settled by cycle 101.

patched print_run
Test: TEST0 Total times: 102
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 0.25555733
Total times: 102
EXP_BROWN_1 has activation: 0.5492452
EXP_BROWN_2 has activation: 0.5492452
EXP_BROWN_3 has activation: 0.5232156
EXP_BROWN_4 has activation: 5.3432705E-5
EXP_BROWN_5 has activation: 5.3432705E-5
EXP_BROWN_6 has activation: 5.3432705E-5
EXP_BROWN_7 has activation: 5.3432705E-5
EXP_BROWN_8 has activation: 0.72387797
G2_1 has activation: 5.3432705E-5
G2_10 has activation: 0.34369504
G2_11 has activation: 0.53758574
G2_12 has activation: 0.7287517
G2_13 has activation: 5.3432705E-5
G2_14 has activation: 5.3432705E-5
G2_15 has activation: 0.34369504
G2_16 has activation: 0.34369504
G2_17 has activation: 5.3432705E-5
G2_18 has activation: 5.3432705E-5
G2_19 has activation: 5.3432705E-5
G2_2 has activation: 5.3432705E-5
G2_20 has activation: 5.3432705E-5
G2_21 has activation: 5.3432705E-5
G2_22 has activation: 5.3432705E-5
G2_23 has activation: 5.3432705E-5
G2_3 has activation: 5.3432705E-5
G2_4 has activation: 5.3432705E-5
G2_5 has activation: 5.3432705E-5
G2_6 has activation: 0.66759783
G2_7 has activation: 5.3432705E-5
G2_7A has activation: 0.66759783
G2_8 has activation: 0.34369504
G2_9 has activation: 5.3432705E-5

ACME-Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Fischgeschichte und erfolgreicher Simulation der Brownschen Bewegung in der Lernphase

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-brown-ball-simulation.lisp  
;autor: michael rohr  
(defaults 'acme)  
;problem 1: Simulation  
(defun make_struc1 ()  
(make_struc 'erfolgreiches_simulations_modell  
'sentence  
'(all  
(  
; Objekte des makroskopischen Versuchs der Brownschen Bewegung von Zigarettenrauchpartikeln  
(rauchkammer (obj_rauchkammer) obj_brown_sim_1)
```

```

(zigarettenrauch (obj_zigarettenrauch) obj_brown_sim_2)
(luft (obj_luft) obj_brown_sim_3)
(zigarettenrauch_broeckchen (obj_zigarettenrauch_broeckchen) obj_brown_sim_4)
; Objekte der Simulation
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_brown_sim_5)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_brown_sim_6)
(simulationsfeld (obj_simulationsfeld) obj_brown_sim_7)
(simulation (obj_simulation) obj_brown_sim_8)
(teilchen (obj_teilchen) obj_brown_sim_9)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_brown_sim_10)
; Propositionen für das Experiment
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) rauch_brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) rauch_brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) rauch_brown_3)
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) rauch_brown_4)
(bestehen_aus (obj_broecken obj_tusche) rauch_brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) rauch_brown_6)
(verursachen (rauch_brown_2 rauch_brown_3 rauch_brown_4 rauch_brown_6) rauch_brown_7)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind und direkte Implika-
tionen
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) brown_sim_1)
(ist_ein (obj_zigarettenrauch obj_stoff) brown_sim_2)
(ist_ein (obj_luft obj_stoff) brown_sim_3)
; Propositionen der Erklärung durch die Simulation
(stattfinden (obj_simulation obj_simulationsfeld) brown_sim_4)
(bestehen_aus (obj_zigarettenrauch obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_5)
(dargestellt_als (obj_zigarettenrauch_broecken obj_grosse_teilchen) brown_sim_6)
(dargestellt_als (obj_luft obj_kleine_teilchen) brown_sim_8)
(starten (obj_selbst obj_simulation) brown_sim_9)
(bewegen_sich (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_10)
(kollidieren (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) brown_sim_11)
(aendern_bewegungsrichtung (obj_grosse_teilchen) brown_sim_12)
(zittern (obj_zigarettenrauch_broeckchen) brown_sim_13)
(dargestellt_als (brown_sim_8 brown_sim_7) brown_sim_14)
(beenden (obj_selbst obj_brown_simulation) brown_sim_15)
(verursachen (brown_sim_5 brown_sim_6) brown_sim_16)
(verursachen (brown_sim_6 brown_sim_7) brown_sim_17)
(verursachen (brown_sim_7 brown_sim_8) brown_sim_18)
) ) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'browsche_bewegung_von_tusche
'sentence
'all
(
(objekttraeger (obj_objekttraeger) obj_brown_1)
(tusche (obj_tusche) obj_brown_2)
(wasser (obj_wasser) obj_brown_3)
(tuschen_broeckchen (obj_tusche_broeckchen) obj_brown_4)
(mikroskop (obj_mikroskop) obj_brown_5)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_1)
(mischen (obj_wasser obj_tusche obj_glas) brown_2)
(tupfen (obj_mischung obj_objekttraeger) brown_3)

```

```
(einsetzen (obj_objekttraeger obj_mikroskop) brown_4)
(bestehen_aus (obj_tusche obj_tusche_broeckchen) brown_5)
(zittern (obj_tusche_broeckchen) brown_6)
(verursachen (brown_2 brown_3 brown_4 brown_6) brown_7)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_brown_6)
(teilchen (obj_teilchen) obj_brown_modell_1)
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_brown_modell_2)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_brown_modell_3)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters nach dem Arbeiten mit der Model-
lierungsumgebung übertragen worden sind
; Ohne diese einfachen Übertragungen bzw. ohne dass die SchülerIn bemerkt, dass die Aussagen
auch für die Testaufgabe gelten,
; kann ACME keine Analogien zwischen den beiden Fällen feststellen und damit letztlich ECHO
die analoge Problemlösung auch nicht nutzen.
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) brown_modell_1)
(ist_ein (obj_tusche obj_stoff) brown_modell_2)
(ist_ein (obj_wasser obj_stoff) brown_modell_3)
(dargestellt_als (obj_tusche_broeckchen obj_grosse_teilchen) brown_modell_4)
(dargestellt_als (obj_wasser obj_kleine_teilchen) brown_modell_5)
(zittern (obj_grosse_teilchen) brown_modell_6)
(dargestellt_als (brown_6 brown_modell_6) brown_modell_7)
) ) )
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung")
  (similar 'aendern_bewegungsrichtung 'zittern.2)
  (constraint_map 'brownsche_bewegung_von_tusche 'erfolgreiches_simulations_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)
```

Ergebnis des ACME-Laufs

```
Network has settled by cycle 50.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 51
makroskopisches_ballmodell_makroskopische_brownsche_bewegung
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 7.1306624
Calculating the best mappings after 51 cycles.
Best mapping of IST_EIN is IST_EIN. 0.875862
Best mapping of DARGESTELLT_ALS is DARGESTELLT_ALS. 0.8962543
Best mapping of KLEINE_TEILCHEN is KLEINE_TEILCHEN. 0.6950557
Best mapping of GROSSE_TEILCHEN is GROSSE_TEILCHEN. 0.6976773
Best mapping of TEILCHEN is TEILCHEN. 0.6957396
Best mapping of STOFF is STOFF. 0.70738065
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.8307786
Best mapping of ZITTERN is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. 0.5496223
Mapping with ZITTERN is also possible: 0.33170354
Best mapping of EINSETZEN is EINSETZEN. 0.7631498
Best mapping of TUPFEN is TUPFEN. 0.7631498
Best mapping of MISCHEN is MISCHEN. 0.72687304
```

Best mapping of BESTEHEN_AUS is BESTEHEN_AUS. 0.89209247
Best mapping of MIKROSKOP is SIMULATION. -1.66295E-4
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with RAUCHKAMMER.
Best mapping of TUSCHEN_BROECKCHEN is ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.5841218
Best mapping of WASSER is LUFT. 0.56536806
Best mapping of TUSCHE is ZIGARETTENRAUCH. 0.58864135
Best mapping of OBJEKTTRAEGER is SIMULATION. -1.66295E-4
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with RAUCHKAMMER.
Best mapping of BROWN_MODELL_7 is BROWN_SIM_3A. 0.71081185
Best mapping of BROWN_MODELL_5 is BROWN_SIM_8. 0.7021952
Best mapping of BROWN_MODELL_4 is BROWN_SIM_6. 0.6391402
Best mapping of BROWN_MODELL_3 is BROWN_SIM_3. 0.7107077
Best mapping of BROWN_MODELL_2 is BROWN_SIM_2. 0.7192299
Best mapping of BROWN_MODELL_1 is BROWN_SIM_1. 0.7136375
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_3 is OBJ_BROWN_SIM_6. 0.58952326
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_2 is OBJ_BROWN_SIM_5. 0.59404266
Best mapping of OBJ_BROWN_MODELL_1 is OBJ_BROWN_SIM_9. 0.5907041
Best mapping of OBJ_BROWN_6 is OBJ_BROWN_SIM_10. 0.6106422
Best mapping of BROWN_7 is RAUCH_BROWN_7. 0.8016746
Best mapping of BROWN_5 is BROWN_SIM_5. 0.2963904
tied with RAUCH_BROWN_1.
Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.2963904
Best mapping of BROWN_1 is BROWN_SIM_5. 0.2963904
tied with RAUCH_BROWN_1.
Mapping with RAUCH_BROWN_1 is also possible: 0.2963904
Best mapping of OBJ_BROWN_5 is OBJ_BROWN_SIM_8. -1.8920054E-4
tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
Best mapping of OBJ_BROWN_4 is OBJ_BROWN_SIM_4. 0.58411217
Best mapping of OBJ_BROWN_3 is OBJ_BROWN_SIM_3. 0.56536806
Best mapping of OBJ_BROWN_2 is OBJ_BROWN_SIM_2. 0.58864135
Best mapping of OBJ_BROWN_1 is OBJ_BROWN_SIM_8. -1.8920054E-4
tied with OBJ_BROWN_SIM_7.
tied with OBJ_BROWN_SIM_1.
Best mapping of BROWN_MODELL_6 is BROWN_SIM_12. 0.7847885
Best mapping of OBJ_KLEINE_TEILCHEN is OBJ_KLEINE_TEILCHEN. 0.77707416
Best mapping of OBJ_GROSSE_TEILCHEN is OBJ_GROSSE_TEILCHEN. 0.8026513
Best mapping of OBJ_TEILCHEN is OBJ_TEILCHEN. 0.7836911
Best mapping of OBJ_STOFF is OBJ_STOFF. 0.9023081
Best mapping of BROWN_2 is RAUCH_BROWN_2. 0.84581757
Best mapping of BROWN_3 is RAUCH_BROWN_3. 0.85765564
Best mapping of BROWN_4 is RAUCH_BROWN_4. 0.85765564
Best mapping of BROWN_6 is RAUCH_BROWN_6. 0.86495477
Best mapping of OBJ_MISCHUNG is OBJ_MISCHUNG. 0.701827
Best mapping of OBJ_GLAS is OBJ_GLAS. 0.64334625
Best mapping of OBJ_MIKROSKOP is OBJ_MIKROSKOP. 0.701827
Best mapping of OBJ_TUSCHE_BROECKCHEN is OBJ_ZIGARETTENRAUCH_BROECKCHEN. 0.85594946
Best mapping of OBJ_WASSER is OBJ_LUFT. 0.7664746
Best mapping of OBJ_TUSCHE is OBJ_ZIGARETTENRAUCH. 0.878053
Best mapping of OBJ_OBJEKTTRAEGER is OBJ_OBJEKTTRAEGER. 0.8146317

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Posttestaufgaben
Eingabedatei für den ECHO-Lauf

; datei: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; autor: Michael Rohr

```

; *****
(defaults 'echo)
; *****
;(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
;(setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
;(clear-net)
; *****
; Geschichte
(proposition 'g2_1 "Ein Boot fährt auf den See hinaus.") ;
(proposition 'g2_2 "Es ist früher Morgen.")
(proposition 'g2_3 "Das Boot fährt zum Fischen.") ;
(proposition 'g2_4 "Die Fischerin will grosse Fische fangen.") ;
(proposition 'g2_5 "Grosse Fische sind zum Beispiel Karpfen und Rotaugen.") ;
proposition 'g2_6 "Sie legt ein Netz.")
(proposition 'g2_7 "Das Netz hat Maschen.")
(proposition 'g2_7a "Die Fische schwimmen in das Netz.")
(proposition 'g2_8 "Die Maschen sind kleiner als die Karpfen.") ;
(proposition 'g2_9 "Wenn die Karpfen in das Netz geraten, können sie deshalb mehr nicht durch
die Maschen hindurch ins freie Wasser entkommen.")
(proposition 'g2_10 "Die Karpfen bleiben gefangen.") ;
(proposition 'g2_11 "In der Enge prallen sie gegeneinander.") ;
(proposition 'g2_12 "Sie ändern dabei immer wieder ihre Schwimmrichtung.") ;
(proposition 'g2_13 "Aber es gibt auch noch kleine Fische im See.")
(proposition 'g2_14 "Kleine Fischen sind zum Beispiel Bitterlinge und Stichlinge.")
(proposition 'g2_15 "Diese kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_16 "Sie entkommen wieder in den See.") ;
(proposition 'g2_17 "Die Fischerin zieht das Netz langsam enger..")
(proposition 'g2_18 "Die kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_19 "Die kleinen Fische entkommen in den See.")
; *****
; Experiment zur Brownschen Bewegung von Tusche in Wasser
(proposition 'exp_brown_1 "In einem kleinen Glas wird etwas Wasser gegeben.") ;
(proposition 'exp_brown_2 "Unter das Wasser werden ein paar Tropfen Tusche gemischt.") ;
(proposition 'exp_brown_3 "Ein Tropfen dieser Mischung wird auf einen Objekttraeger getupft.") ;
(proposition 'exp_brown_4 "Der Objekttraeger wird unter ein Mikroskop eingespannt, dass auf
etwas 500-fache Vergrößerung eingestellt ist.") ;
(proposition 'exp_brown_5 "Auf das Mikroskop wird die Speziallinse gesetzt, mit der durch das
Mikroskop ein Video aufgenommen werden kann. ;
(proposition 'exp_brown_6 "Dieses Video kannst du jetzt gleich auf dem Fernsehbildschirm an-
schauen.") ;
(proposition 'exp_brown_7 "Es sind braune Bröckchen zu sehen.") ;
(proposition 'exp_brown_8 "Die Tusche besteht aus den braunen Bröckchen")
(proposition 'exp_brown_9 "Die braunen Bröckchen zittern.") ;
; Zusätzlicher Teil, der nach einer erfolgreichen Analogiebildung zwischen Test-Experiment und
Simulationsexperiment als neu gelernt angenommen wird.
(proposition 'exp_brown_10 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilche.");
(proposition 'exp_brown_11 "Tusche ist ein Stoff.") ;
(proposition 'exp_brown_12 "Wasser ist ein Stoff.") ;
(proposition 'exp_brown_13 "Tuschebröckchen werden als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'exp_brown_14 "Wasser wird als Teilchen dargestellt.") ;
(proposition 'exp_brown_15 "Das Zittern der Tuschebröckchen wird als Bewegungsveränderung der
Tuschebröckchenteilchen dargestellt.")
; *****

```

```

; Erfolgreiche Simulation
(proposition 'simulation_1 "Die Simulation findet auf einem Simulationsfeld statt.") ;
(proposition 'simulation_2 "Es werden grosse Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_3 "Es werden kleine Kugeln auf das Simulationsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_4 "Ich starte die Simulation.") ;
(proposition 'simulation_5 "Die Kugeln bewegen sich nach dem Start der Simulation.")
(proposition 'simulation_6 "Die Kugeln prallen ab und zu aufeinander.");
(proposition 'simulation_7 "Die grossen Kugeln aendern dann ihre Bewegungsrichtung.");
(proposition 'simulation_8 "Ich beende die Simulation. ") ;
; Makroskopische Beschreibung des Experiments der Lernphase
(proposition 'simulation_9 "Luft befindet sich in einer Rauchkammer.")
(proposition 'simulation_10 "Zigarettenrauch befindet sich in einer Rauchkammer.")
(proposition 'simulation_11 "Die Rauchkammer wird unter ein Mikroskop gespannt.")
(proposition 'simulation_12 "Die Rauchkammer wird durch einen Spalt mit Licht bestrahlt.")
(proposition 'simulation_13 "Die Zigarettenrauchbroeckchen zittern unter dem Mikroskop.")
; Beschreibung der Modellbeziehung zwischen Simulation und dazugehörigen Experiment
(proposition 'simulation_14 "Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen.") ;
(proposition 'simulation_15 "Zigarettenrauch ist ein Stoff.") ;
(proposition 'simulation_16 "Luft ist ein Stoff.") ;
(proposition 'simulation_17 "Zigarettenrauch besteht aus Zigarettenrauchbroeckchen.")
.*****
; Erklärungen in der Geschichte
; 2. Erklärung, warum die grossen Fischen im Netz hin und her schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_7a g2_11) 'g2_12)
.*****
; Erklärungs zusammenhaenge im Experiment in der Simulationsphase
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe
(explain '(simulation_14 simulation_15 simulation_17) 'simulation_2)
(explain '(simulation_14 simulation_16) 'simulation_3)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Zigarettenbröckchen
(explain '(simulation_7) 'simulation_13)
; 2. Makroskopische Erklärung der Beobachtung im Experiment: analog der makroskopischen Er-
klärung des Posttestexperiments
(explain '(simulation_9 simulation_10 simulation_11) 'simulation_13)
.*****
; Erklärungs zusammenhaenge der erfolgreichen Konstruktion des Zitterns der grossen Kugeln
; Erklärungskette, warum die Baele in der Simulation kreuz und quer fliegen.
(explain '(simulation_2 simulation_3 simulation_4) 'simulation_5)
(explain '(simulation_5) 'simulation_6)
(explain '(simulation_6) 'simulation_7)
.*****
; Erklärung im Posttest-Experiment zur Brownschen Bewegung
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 2 beteiligte Stoffe
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_11 exp_brown_13) 'exp_brown_14)
(explain '(exp_brown_10 exp_brown_12) 'exp_brown_15)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Zittern der Tuschebröckchen
(explain '(exp_brown_15) 'exp_brown_9)
; Wie beim Experiment zur Simulation eine makroskopische Erklärung, die die Beobachtung auf
den experimentellen Aufbau zurueckfuehrt.
(explain '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3) 'exp_brown_9)
.*****
; Analogien
; 1. Zwischen Posttest-Experiment und Geschichte: Die Analogie wurde durch den ACME zur Ana-

```

```

logiebildung zwischen Experiment und Geschichte bestimmt.
(analogous '(g2_6 exp_brown_1) '(g2_12 exp_brown_9) )
(analogous '(g2_7a exp_brown_2) '(g2_12 exp_brown_9) )
(analogous '(g2_11 exp_brown_3) '(g2_12 exp_brown_9) )
.*****
; Erklärungsanalogien zwischen Geschichte und Lernphasen-Experiment
; Die makroskopische Erklärungsanalogie ist im Prinzip die gleiche wie die zwischen Geschichte
und Test-Experiment
(analogous '(g2_6 simulation_9) '(g2_12 simulation_13) )
(analogous '(g2_7a simulation_10) '(g2_12 simulation_13) )
(analogous '(g2_11 simulation_11) '(g2_12 simulation_13) )
.*****
; Erklärungsanalogien zwischen Test-Experiment und Lernphasen-Experiment
; 1. Modellbeziehungen
; a. Tuschebröckchen vs. Zigarettenrauchbröckchen
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_15 exp_brown_11) '(simulation_2 exp_brown_14) )
(analogous '(simulation_17 exp_brown_13) '(simulation_2 exp_brown_14) )
; b. Wasser vs. Luft
(analogous '(simulation_14 exp_brown_10) '(simulation_3 exp_brown_15) )
(analogous '(simulation_16 exp_brown_12) '(simulation_3 exp_brown_15) )
; Entsprechend gilt es für das Erklärungsziel, das Zittern der Tusche-, bzw. Zigarettenrauchteilchen
(analogous '(simulation_7 exp_brown_15) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 2. Makroskopische Erklärungen sind teilweise ebenfalls analog
(analogous '(simulation_9 exp_brown_1) '(simulation_13 exp_brown_9) )
(analogous '(simulation_10 exp_brown_2) '(simulation_13 exp_brown_9) )
; 3. Disanalogien
; Da es in der Geschichte keine Erklärung der Fischbewegung gibt (sie wird einfach aufgeführt),
gibt es hier keine Disanalogie
; Das hat aber keine grossen Auswirkungen auf das Verhalten von ECHO in diesem Lauf.
.*****
(data '(exp_brown_1 exp_brown_2 exp_brown_3 exp_brown_4 exp_brown_5 exp_brown_6 exp_brown_7
exp_brown_8 exp_brown_9
simulation_9 simulation_10 simulation_11 simulation_12 simulation_13))
(gross_on)
(run_exp)
(exit)

```

Ergebnis des ECHO-Laufs

```

Network has settled by cycle 82.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 83
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 1.8279942
Total times: 83
EXP_BROWN_1 has activation: 0.8039017
EXP_BROWN_10 has activation: 0.722116
EXP_BROWN_11 has activation: 0.5304595
EXP_BROWN_12 has activation: 0.55699074
EXP_BROWN_13 has activation: 0.5304595
EXP_BROWN_14 has activation: 0.734166
EXP_BROWN_15 has activation: 0.7773944
EXP_BROWN_2 has activation: 0.8039017

```

EXP_BROWN_3 has activation: 0.7710268
EXP_BROWN_4 has activation: 0.6599991
EXP_BROWN_5 has activation: 0.6599991
EXP_BROWN_6 has activation: 0.6599991
EXP_BROWN_7 has activation: 0.6599991
EXP_BROWN_8 has activation: 0.6599991
EXP_BROWN_9 has activation: 0.8887802
G2_1 has activation: 1.4159856E-4
G2_10 has activation: 1.4159856E-4
G2_11 has activation: 0.68891525
G2_12 has activation: 0.8490235
G2_13 has activation: 1.4159856E-4
G2_14 has activation: 1.4159856E-4
G2_15 has activation: 1.4159856E-4
G2_16 has activation: 1.4159856E-4
G2_17 has activation: 1.4159856E-4
G2_18 has activation: 1.4159856E-4
G2_19 has activation: 1.4159856E-4
G2_2 has activation: 1.4159856E-4
G2_3 has activation: 1.4159856E-4
G2_4 has activation: 1.4159856E-4
G2_5 has activation: 1.4159856E-4
G2_6 has activation: 0.69465053
G2_7 has activation: 1.4159856E-4
G2_7A has activation: 0.69465053
G2_8 has activation: 1.4159856E-4
G2_9 has activation: 1.4159856E-4
SIMULATION_1 has activation: 1.4159856E-4
SIMULATION_10 has activation: 0.80389035
SIMULATION_11 has activation: 0.77101046
SIMULATION_12 has activation: 0.6599991
SIMULATION_13 has activation: 0.8877972
SIMULATION_14 has activation: 0.720961
SIMULATION_15 has activation: 0.53213406
SIMULATION_16 has activation: 0.55257845
SIMULATION_17 has activation: 0.53213406
SIMULATION_2 has activation: 0.761634
SIMULATION_3 has activation: 0.7256205
SIMULATION_4 has activation: 0.39081922
SIMULATION_5 has activation: 0.5280977
SIMULATION_6 has activation: 0.5383181
SIMULATION_7 has activation: 0.680473
SIMULATION_8 has activation: 1.4159856E-4
SIMULATION_9 has activation: 0.80389035

A.2.2 Simulationen der Lern- und Testaufgaben zur Diffusion

A.2.2.1 Gruppe, die Ballgeschichte las

ACME- Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Ballgeschichte und Diffusionsexperiment des Prätests

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```

;datei: acme-diffusion-ball-prae.lisp
;ziel: Modellierung des verhaltens beim erklären der brownschen bewegung nach dem lesen der analogie-
geschichte
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
(defun make_struct ()
(make_struct 'makroskopisches_ball_modell
'sentence
'all
(
(klasse (obj_klasse) obj_ballspiel_1)
(ballspiel (obj_ballspiel) obj_ballspiel_2)
(baelle (obj_baelle) obj_ballspiel_3)
(grosse_baelle (obj_grosse_baelle) obj_ballspiel_4)
(kleine_baelle (obj_kleine_baelle) obj_ballspiel_5)
(gruppe_1 (obj_gruppe_1) obj_ballspiel_6)
(gruppe_2 (obj_gruppe_2) obj_ballspiel_7)
(haelfte_1 (obj_haelfte_1) obj_ballspiel_8)
(netz (obj_netz) obj_ballspiel_9)
(boden (obj_boden) obj_ballspiel_10)
(decke (obj_decke) obj_ballspiel_11)
(linke_wand (obj_linke_wand) obj_ballspiel_12)
(rechte_wand (obj_rechte_wand) obj_ballspiel_13)
(groessere_maschen (obj_groessere_maschen) obj_ballspiel_14)
(kleinere_maschen (obj_kleinere_maschen) obj_ballspiel_15)
(sportlehrerin (obj_sportlehrerin) obj_ballspiel_16)
(halle (obj_halle) obj_ballspiel_17)
(enthalt (obj_ballspiel obj_groesse_baelle obj_kleine_baelle) ballspiel_1)
(geteilt (obj_klasse obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_2)
(sich_befinden (obj_haelfte1 obj_gruppe1) ballspiel_3)
(sich_befinden (obj_haelfte2 obj_gruppe2) ballspiel_4)
(haben_gleiche_anzahl (obj_baelle obj_gruppe1 obj_gruppe2) ballspiel_5)
(gespannt (obj_netz obj_halle) ballspiel_6)
(reicht (obj_netz obj_boden obj_decke obj_linke_wand obj_rechte_wand) ballspiel_7)
(enthalt (obj_netz obj_groessere_maschen obj_kleinere_maschen) ballspiel_8)
(starten (obj_sportlehrerin ballspiel_10) ballspiel_9)
(faengt_an (obj_gruppe obj_ballspiel) ballspiel_10)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_1 obj_baelle obj_netz) ballspiel_11)
(hindurch_werfen (obj_gruppe_2 obj_baelle obj_netz) ballspiel_12)
(hat_aufgabe (obj_gruppe1 ballspiel_13) ballspiel_13)
(hat_aufgabe (obj_gruppe2 ballspiel_14) ballspiel_14)
(treffen_sich (obj_baelle) ballspiel_15)
(fliegen_kreuz_und_quer (obj_baelle) ballspiel_16)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_15 ballspiel_16) ballspiel_17)
(hindurch_passen (obj_kleine_baelle obj_kleinere_maschen) ballspiel_18)
(durchqueren (obj_kleine_baelle obj_netz) ballspiel_19)
(nicht_hindurch_passen (obj_grosse_baelle obj_groessere_maschen) ballspiel_20)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_21)
(abprallen (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_22)
(zurueck_fliegen_aus (obj_grosse_baelle obj_netz) ballspiel_23)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_18 ballspiel_19) ballspiel_24)
(verursachen (ballspiel_9 ballspiel_10 ballspiel_20 ballspiel_21) ballspiel_25)
(beendet_spiel (obj_sportlehrerin obj_ballspiel) ballspiel_26)
(zahlen (obj_alle_personen obj_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ballspiel_27)

```

```

(entscheiden (obj_alle_personen obj_mehr_baelle obj_haelfte1 obj_haelfte2) ballspiel_28)
))) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch
'sentence
'(all
(
(glas_becher (obj_glas_becher) diffusionobj_1)
(dialyse_schlauch_mit_Wasser (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusionobj_2)
(innerhalb_dialyse_schlauch (obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusionobj_3)
(ausserhalb_dialyse_schlauch (obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) diffusionobj_4)
(farbstoff_1 (obj_farbstoff_1) diffusionobj_5)
(farbstoff_2 (obj_farbstoff_2) diffusionobj_6)
(experiment (obj_experiment) diffusionobj_7)
(violett (obj_farbstoff_1) diffusion_1)
(gelb (obj_farbstoff_2) diffusion_2)
(starten (obj_experimentator obj_experiment) diffusion_3)
(legen (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_glasbecher) diffusion_4)
(sich_befinden (obj_farbstoff_1 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_5)
(sich_befinden (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_6)
(durchqueren (obj_farbstoff_1 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusion_7)
(nicht_durchqueren (obj_farbstoff_2 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusion_8)
; Dass das Experiment damit beginnt, dass der Dialyseschlauch in den Becher gelegt wird,
; und der Schlauch danach im Becher liegt,
; und dass sich der violette Farbstoff im Dialyseschlauch befindet,
; wird als (rein beschreibende) Ursache dafür gesehen, dass der violette Farbstoff den Schlauch
durchquert.
(verursachen (diffusion_3 diffusion_4 diffusion_5 diffusion_7) diffusion_10)
; Dass das Experiment damit beginnt, dass der Dialyseschlauch in den Becher gelegt wird,
; und der Schlauch danach im Becher liegt,
; und dass sich der gelb Farbstoff im Dialyseschlauch befindet,
; wird als (rein beschreibende) Ursache dafür gesehen, dass der gelbe Farbstoff den Schlauch nicht
durchquert.
(verursachen (diffusion_3 diffusion_4 diffusion_6 diffusion_8) diffusion_11)
(gelangen (obj_farbstoff_1 obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) diffusion_12)
(bleiben (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_13)
))) )
(defun acme ()
(clear_net)
(make_struc1)
(make_struc2)
(setq experiment "makroskopisches_ballmodell_makroskopische_farbstoffosmose")
(similar 'dialyse_schlauch 'netz.2)
(constraint_map 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch 'makroskopisches_ball_modell)
(acme-mode)
(wtp '(500))
(run_hyp_net 'acme)
)
(acme)

```

Ergebnis des ACME-Laufs

```

Network has settled by cycle 64.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 65

```

makroskopisches_ballmodell_makroskopische_farbstoffosmose
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 5.484981
Calculating the best mappings after 65 cycles.
Best mapping of BLEIBEN is ZURUECK_FLIEGEN_AUS. 0.3063197
tied with ABPRALLEN.
Mapping with ABPRALLEN is also possible: 0.3063197
Best mapping of GELANGEN is HINDURCH_PASSEN. 0.6284025
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.9371535
Best mapping of NICHT_DURCHQUEREN is NICHT_DURCHQUEREN. 0.75032556
Best mapping of DURCHQUEREN is DURCHQUEREN. 0.7475091
Best mapping of SICH_BEFINDEN is NICHT_HINDURCH_PASSEN. 0.7485121
Best mapping of LEGEN is FAENGT_AN. 0.6336372
Best mapping of STARTEN is BEENDET_SPIEL. -2.3658928E-5
Best mapping of GELB is GROSSE_BAELLE. 0.23593609
Best mapping of VIOLETT is KLEINE_BAELLE. 0.21546832
Best mapping of EXPERIMENT is FLIEGEN_KREUZ_UND_QUER. -5.3763186E-5
tied with TREFFEN_SICH.
tied with HALLE.
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with BAELLE.
tied with BALLSPIEL.
tied with KLASSE.
Best mapping of FARBSTOFF_2 is GROSSE_BAELLE. 0.23593609
Best mapping of FARBSTOFF_1 is KLEINE_BAELLE. 0.21546832
Best mapping of AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is KLEINERE_MASCHEN. 0.5561064
Best mapping of INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is GROESSERE_MASCHEN. 0.52374977
Best mapping of DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is NETZ. 0.533937
Best mapping of GLAS_BECHER is FLIEGEN_KREUZ_UND_QUER. -5.3763186E-5
tied with TREFFEN_SICH.
tied with HALLE.
tied with SPORTLEHRERIN.
tied with RECHTE_WAND.
tied with LINKE_WAND.
tied with DECKE.
tied with BODEN.
tied with HAELFTE_1.
tied with GRUPPE_2.
tied with GRUPPE_1.
tied with BAELLE.
tied with BALLSPIEL.
tied with KLASSE.
Best mapping of DIFFUSION_13 is BALLSPIEL_23. 0.3063197
tied with BALLSPIEL_22.
Mapping with BALLSPIEL_22 is also possible: 0.3063197
Best mapping of DIFFUSION_12 is BALLSPIEL_18. 0.27795696
Best mapping of DIFFUSION_11 is BALLSPIEL_25. 0.55604315
Mapping with BALLSPIEL_17 is also possible: 0.33174652
Best mapping of DIFFUSION_10 is BALLSPIEL_24. 0.6419821
Best mapping of DIFFUSION_2 is OBJ_BALLSPIEL_4. 0.23593609
Best mapping of DIFFUSION_1 is OBJ_BALLSPIEL_5. 0.21546832

Best mapping of DIFFUSIONOBJ_7 is OBJ_BALLSPIEL_17. -5.3763186E-5
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_3.
tied with OBJ_BALLSPIEL_2.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_6 is OBJ_BALLSPIEL_4. 0.23593609
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_5 is OBJ_BALLSPIEL_5. 0.21546832
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_4 is OBJ_BALLSPIEL_15. 0.5561064
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_3 is OBJ_BALLSPIEL_14. 0.52374977
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_2 is OBJ_BALLSPIEL_9. 0.533937
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_1 is OBJ_BALLSPIEL_17. -5.3763186E-5
tied with OBJ_BALLSPIEL_16.
tied with OBJ_BALLSPIEL_13.
tied with OBJ_BALLSPIEL_12.
tied with OBJ_BALLSPIEL_11.
tied with OBJ_BALLSPIEL_10.
tied with OBJ_BALLSPIEL_8.
tied with OBJ_BALLSPIEL_7.
tied with OBJ_BALLSPIEL_6.
tied with OBJ_BALLSPIEL_3.
tied with OBJ_BALLSPIEL_2.
tied with OBJ_BALLSPIEL_1.
Best mapping of DIFFUSION_6 is BALLSPIEL_20. 0.6038396
Mapping with BALLSPIEL_15 is also possible: 0.31390822
Best mapping of DIFFUSION_8 is BALLSPIEL_21. 0.6582668
Mapping with BALLSPIEL_16 is also possible: 0.30041194
Best mapping of DIFFUSION_3 is BALLSPIEL_9. 0.9342752
Best mapping of DIFFUSION_4 is BALLSPIEL_10. 0.93852246
Best mapping of DIFFUSION_5 is BALLSPIEL_18. 0.4770974
Mapping with BALLSPIEL_20 is also possible: 0.25144392
Best mapping of DIFFUSION_7 is BALLSPIEL_19. 0.72270375
Best mapping of OBJ_GLASBECHER is OBJ_BALLSPIEL. 0.6336372
Best mapping of OBJ_EXPERIMENTATOR is OBJ_SPORTLEHRERIN. -1.841886E-5
Best mapping of OBJ_EXPERIMENT is OBJ_BAELLE. -4.3387816E-5
Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_2 is OBJ_GROSSE_BAELLE. 0.8440053
Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_1 is OBJ_KLEINE_BAELLE. 0.7333272
Best mapping of OBJ_AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_KLEINERE_MASCHEN. 0.7261436
Best mapping of OBJ_INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_GROESSERE_MASCHEN. 0.6002404
Mapping with OBJ_NETZ is also possible: 0.45924369
Best mapping of OBJ_DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is OBJ_NETZ. 0.6370151
Mapping with OBJ_GRUPPE is also possible: 0.20591366
Best mapping of OBJ_GLAS_BECHER is OBJ_BAELLE. -3.814773E-5

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Prätetaufgabe
Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```
; DATEI: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; AUTOR: Michael Rohr
; *****
; (defaults 'echo)
; *****
```

```

(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
  (setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
  (clear-net)
  ;*****
  ; Geschichte
  (proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde faengt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.")
  (proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Baelle") ;
  (proposition 'g1_3 "Die Baelle sind gross oder klein.") ;
  (proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.") ;
  (proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Haelfte der Sporthalle.") ;
  (proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Haelfte der Sporthalle.") ;
  (proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bae?llen.
  ") ;
  (proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
  (proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
  (proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
  (proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
  (proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige groesser und viele kleiner.") ;
  (proposition 'g1_13 "Die groesseren Maschen sind gerade so gross wie die groessten Balle.")
  (proposition 'g1_14 "Die groessten Baelle passen nicht durch die groessten Maschen.")
  (proposition 'g1_15 "Die kleineren Baelle passen durch die groessten Maschen.")
  (proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
  (proposition 'g1_17 "Die kleineren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
  (proposition 'g1_18 "Die groesseren Baelle passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
  (proposition 'g1_19 "Jede Gruppe muss nach dem Spielstart versuchen, so viele Baelle wie moeglich
  durch das Netz in die Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
  (proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
  (proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baelle zum Netz.") ;
  (proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baelle.") ;
  (proposition 'g1_23 "Die Baelle fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
  (proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baelle passen durch die Maschen.")
  (proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baelle passen nirgendwo hindurch.")
  (proposition 'g1_26 "Die kleinen Baelle fliegen durch das Netz.")
  (proposition 'g1_27 "Die groesseren Baelle durchqueren das Netz nicht.")
  (proposition 'g1_28 "Die kleinen Baelle fliegen fast immer in das Netz.")
  (proposition 'g1_29 "Die grossen Baelle werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
  (proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;
  (proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baelle in die Haelfte
  der anderen befoerdert hat.") ;
  ;*****
  ; Diffusionsexperiment
  (proposition 'exp_diffusion_1 "In einem Glasgefaess befindet sich Wasser.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_2 "In einen Dialyseschlauch befindet sich eine Farbstoffloesung mit der
  Farbe lila.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_3 "Im Dialyseschlauch befindet sich eine weitere Farbstoffloesung mit
  der Farbe gelb.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_4 "Das Experiment wird gestartet.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_5 "Der Dialyseschlauch wird in das Gefaess mit dem Wasser gelegt.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_6 "Der lila Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_7 "Der gelbe Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch nicht.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_8 "Nach kurzer Zeit bilden sich im Wasser unterhalb des Dialyse-
  schlauchs Schlieren.") ;
  (proposition 'exp_diffusion_9 "Die Schlieren haben die Farbe lila.")

```

```
(proposition 'exp_diffusion_10 "Nach einer Weile erscheint der Dialyseschlauch gelb.") ;
(proposition 'exp_diffusion_11 "Nach einer Weile wird die lila Farbe im Wasser staerker.")
.*****
; 1. Zwei Erklärungen, warum grosse Baele zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_24) 'g1_26)
(explain '(g1_20 g1_21 g1_25) 'g1_27)
; 2. Erklärung, warum die Baele kreuz und quer fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_22) 'g1_23)
.*****
; Erklaerungszusammenhaenge im Experiment
; Hier bestehen Erklaerungszusammenhaenge, die dann auch Erklaerungsanalogien ermaeglichen.
(explain '(exp_diffusion_2 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_7)
.*****
Analogien
; Die Analogie wurde durch den ACME zur Analogiebildung zwischen Experiment und Geschichte
bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_21 exp_diffusion_5) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_21 exp_diffusion_5) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g1_20 exp_diffusion_4) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_20 exp_diffusion_4) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g1_24 exp_diffusion_2) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_25 exp_diffusion_3) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
.*****
(data '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5 exp_diffusion_7
exp_diffusion_7 exp_diffusion_8 exp_diffusion_9 exp_diffusion_10 exp_diffusion_11))
(gross_on)
(run_exp)
Ergebnis des ECHO-Laufs
Network has settled by cycle 60.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 61
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 1.0331346
Total times: 61
EXP_DIFFUSION_1 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_10 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_11 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_2 has activation: 0.7647755
EXP_DIFFUSION_3 has activation: 0.7670034
EXP_DIFFUSION_4 has activation: 0.82894117
EXP_DIFFUSION_5 has activation: 0.82894117
EXP_DIFFUSION_6 has activation: 0.74374735
EXP_DIFFUSION_7 has activation: 0.86763084
EXP_DIFFUSION_8 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_9 has activation: 0.65996784
G1_1 has activation: 4.3766276E-4
G1_10 has activation: 4.3766276E-4
G1_11 has activation: 4.3766276E-4
G1_12 has activation: 4.3766276E-4
G1_13 has activation: 4.3766276E-4
G1_14 has activation: 4.3766276E-4
G1_15 has activation: 4.3766276E-4
```

G1_16 has activation: 4.3766276E-4
G1_17 has activation: 4.3766276E-4
G1_18 has activation: 4.3766276E-4
G1_19 has activation: 4.3766276E-4
G1_2 has activation: 4.3766276E-4
G1_20 has activation: 0.77360475
G1_21 has activation: 0.77360475
G1_22 has activation: 0.37579006
G1_23 has activation: 0.37579006
G1_24 has activation: 0.5969173
G1_25 has activation: 0.59880185
G1_26 has activation: 0.73882
G1_27 has activation: 0.7606988
G1_28 has activation: 4.3766276E-4
G1_29 has activation: 4.3766276E-4
G1_3 has activation: 4.3766276E-4
G1_30 has activation: 4.3766276E-4
G1_31 has activation: 4.3766276E-4
G1_4 has activation: 4.3766276E-4
G1_5 has activation: 4.3766276E-4
G1_6 has activation: 4.3766276E-4
G1_7 has activation: 4.3766276E-4
G1_8 has activation: 4.3766276E-4
G1_9 has activation: 4.3766276E-4

ACME-Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Ballgeschichte und erfolgreicher Simulation der Diffusion in der Lernphase

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-diffusion-ball-simulation.lisp
;datei: acme-diffusion-ball-simulation.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
;problem 1: Simulation
(defun make_struc1 ()
  (make_struc 'erfolgreiches_gas_diffusions_simulations_modell
    'sentence
    '(all
      (
        ; Objekte des zugrundeliegenden Experiments, der gas_diffusion durch einen Tonzylinder
        (glas_becher (obj_glasbecher obj_gas_diffusion_1)
          (tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser (obj_tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser) obj_gas_diffusion_2)
          (innerhalb_tonzylinder (obj_innerhalb_tonzylinder) obj_gas_diffusion_3)
          (ausserhalb_tonzylinder (obj_ausserhalb_tonzylinder) obj_gas_diffusion_4)
          (wasserstoff (obj_wasserstoff) obj_gas_diffusion_5)
          (sauerstoff (obj_sauerstoff) obj_gas_diffusion_6)
        ; Objekte der Simulation
        (grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_gas_diff_sim_7)
          (kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_gas_diff_sim_8)
          (simulationsfeld (obj_simulationsfeld) obj_gas_diff_sim_9)
          (gas_diffusion_simulation (obj_gas_diffusion_simulation) obj_gas_diff_sim_10)
          (teilchen (obj_teilchen) obj_gas_diff_sim_11)
          (hindernisreihen_luecken (obj_hindernisreihen_luecken) obj_gas_diff_sim_13)
          (hindernisreihe_mit_luecken (obj_hindernisreihe_mit_luecken) obj_gas_diff_sim_14)
          (teilchen_gitter (obj_teilchen_gitter) obj_gas_diff_sim_15)
        ; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
```

```

(stoff (obj_stoff) obj_gas_diffusion_16)
; Propositionen, die das zugehörige Experiment der gas_diffusion durch Ton beschreiben
(starten (obj_experiment) gas_diffusion_1)
(montieren_unter (obj_tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser obj_glasbecher) gas_diffusion_2)
(leiten (obj_wasserstoff obj_unter_glasbecher) gas_diffusion_3)
(leiten (obj_sauerstoff obj_unter_glasbecher) gas_diffusion_4)
(durchqueren (obj_wasserstoff obj_tonzylinder) gas_diffusion_5)
(nicht_durchqueren (obj_sauerstoff obj_tonzylinder) gas_diffusion_6)
(sprudeln (obj_wasserstoff obj_wasser) gas_diffusion_7)
(verursachen (gas_diffusion_1 gas_diffusion_2 gas_diffusion_3 gas_diffusion_5) gas_diffusion_8)
(verursachen (gas_diffusion_1 gas_diffusion_2 gas_diffusion_4 gas_diffusion_6) gas_diffusion_9)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind und direkte Implika-
tionen
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) gas_diff_modell_1)
(ist_ein (obj_wasserstoff obj_stoff) gas_diffusion_10)
(ist_ein (obj_sauerstoff obj_stoff) gas_diffusion_11)
(ist_ein (obj_ton obj_stoff) gas_diffusion_12)
(besteht_aus (obj_tonzylinder obj_ton) gas_diffusion_13)
; Propositionen der Erklärung durch die Simulation
(dargestellt_als (obj_wasserstoff obj_kleine_teilchen) gas_diff_modell_2)
(dargestellt_als (obj_wasserstoff obj_grosse_teilchen) gas_diff_modell_3)
(dargestellt_als (obj_tonzylinder obj_teilchen_gitter) gas_diff_modell_4)
(stattfinden (obj_diff_sim obj_simulationsfeld) gas_diff_sim_1)
(starten (obj_gas_diffusion_simulation) gas_diff_sim_2)
(bewegen_sich (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) gas_diff_sim_3)
(bestehen_aus (obj_simulation obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken)
diff_sim_4)
(enthalten (hindernisreihe_mit_luecken obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_5)
(hindurch_passen (obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_6)
(durchqueren (obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken) gas_diff_sim_7)
(nicht_hindurch_passen (obj_grosse_teilchen obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_8)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken) gas_diff_sim_9)
(verursachen (gas_diff_sim_2 gas_diff_sim_3) gas_diff_sim_10)
(verursachen (gas_diff_sim_3 gas_diff_sim_6 gas_diff_sim_7) gas_diff_sim_11)
(verursachen (gas_diff_sim_3 gas_diff_sim_8 gas_diff_sim_9) gas_diff_sim_12)
(beenden (obj_gas_diffusion_simulation) gas_diff_sim_13)
(dargestellt_als (gas_diffusion_5 gas_diff_sim_7) gas_diff_modell_5)
(dargestellt_als (gas_diffusion_6 gas_diff_sim_9) gas_diff_modell_6)
))))
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch
'sentence
'all
(
(glas_becher (obj_glas_becher) obj_farb_diffusion_1)
(dialyse_schlauch_mit_Wasser (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) obj_farb_diffusion_2)
(innerhalb_dialyse_schlauch (obj_innerhalb_dialyse_schlauch) obj_farb_diffusion_3)
(ausserhalb_dialyse_schlauch (obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) obj_farb_diffusion_4)
(farbstoff_1 (obj_farbstoff_1) obj_farb_diffusion_5)
(farbstoff_2 (obj_farbstoff_2) obj_farb_diffusion_6)
(experiment (obj_experiment) obj_farb_diffusion_7)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_farb_diffusion_8)

```

```

(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_farb_diff_modell_1)
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_farb_diff_modell_2)
(teilchen_gitter (obj_teilchen_gitter) obj_farb_diff_modell_3)
(violett (obj_farbstoff_1) farb_diffusion_1)
(gelb (obj_farbstoff_2) farb_diffusion_2)
(starten (obj_experiment) farb_diffusion_3)
(legen (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_glasbecher) farb_diffusion_4)
(sich_befinden (obj_farbstoff_1 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_5)
(sich_befinden (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_6)
(durchqueren (obj_farbstoff_1 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) farb_diffusion_7)
(nicht_durchqueren (obj_farbstoff_2 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) farb_diffusion_8)
(verursachen (farb_diffusion_3 farb_diffusion_4 farb_diffusion_5 farb_diffusion_7) farb_diffusion_10)
(verursachen (farb_diffusion_3 farb_diffusion_4 farb_diffusion_6 farb_diffusion_8) farb_diffusion_11)
(gelangen (obj_farbstoff_1 obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_12)
(bleiben (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_13)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters nach dem Arbeiten mit der Model-
lierungsumgebung übertragen worden sind
; Ohne diese einfachen Übertragungen bzw. ohne dass die SchülerIn bemerkt, dass die Aussagen
auch für die Testaufgabe gelten,
; kann ACME keine Analogien zwischen den beiden Fällen feststellen und damit letztlich ECHO
die analoge Problemlösung auch nicht nutzen.
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) farb_diff_modell_1)
(ist_ein (obj_farbstoff_1 obj_stoff) farb_diffusion_14)
(ist_ein (obj_farbstoff_2 obj_stoff) farb_diffusion_15)
(dargestellt_als (obj_farbstoff_1 obj_kleine_teilchen) farb_diff_modell_2)
(dargestellt_als (obj_farbstoff_2 obj_grosse_teilchen) farb_diff_modell_3)
(dargestellt_als (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_4)
(durchqueren (obj_kleine_teilchen obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_5)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_teilchen obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_6)
(dargestellt_als (farb_diffusion_7 farb_diff_modell_5) farb_diff_modell_7)
(dargestellt_als (farb_diffusion_8 farb_diff_modell_6) farb_diff_modell_8)
))))
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "farbstoffdiff_sim")
  (similar 'aendern_bewegungsrichtung 'zittern.2)
  (constraint_map 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch 'erfolgreiches_gas_diffusions_simulations_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)

```

Ergebnis des ACME-Laufs

```

Network has settled by cycle 88.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 89
farbstoffdiff_sim
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 9.7909775
Calculating the best mappings after 89 cycles.
Best mapping of IST_EIN is IST_EIN. 0.89962524
Best mapping of DARGESTELLT_ALS is DARGESTELLT_ALS. 0.9297442

```

Best mapping of BLEIBEN is LEITEN. 0.248585
Best mapping of GELANGEN is SPRUDELN. 0.66138506
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.92235446
Best mapping of NICHT_DURCHQUEREN is NICHT_DURCHQUEREN. 0.83485156
Best mapping of DURCHQUEREN is DURCHQUEREN. 0.81904554
Best mapping of SICH_BEFINDEN is LEITEN. 0.7679225
Best mapping of LEGEN is MONTIEREN_UNTER. 0.641624
Best mapping of STARTEN is STARTEN. 0.7093768
Best mapping of GELB is SAUERSTOFF. 0.2021828
Best mapping of VIOLETT is WASSERSTOFF. 0.2069435
Best mapping of TEILCHEN_GITTER is TEILCHEN_GITTER. 0.646791
Best mapping of GROSSE_TEILCHEN is GROSSE_TEILCHEN. 0.70149857
Best mapping of KLEINE_TEILCHEN is KLEINE_TEILCHEN. 0.70199543
Best mapping of STOFF is STOFF. 0.7087345
Best mapping of EXPERIMENT is BEENDEN. 7.4640634E-11
tied with GAS_DIFFUSION_SIMULATION.
Best mapping of FARBSTOFF_2 is SAUERSTOFF. 0.2021828
Best mapping of FARBSTOFF_1 is WASSERSTOFF. 0.2069435
Best mapping of AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is HINDERNISREIHEN_LUECKEN. -4.9154655E-6
tied with TEILCHEN.
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with AUSSERHALB_TONZYLINDER.
tied with INNERHALB_TONZYLINDER.
Best mapping of INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is HINDERNISREIHEN_LUECKEN. -4.9154655E-6
tied with TEILCHEN.
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with AUSSERHALB_TONZYLINDER.
tied with INNERHALB_TONZYLINDER.
Best mapping of DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is TONZYLINDER_MIT_ABLEITUNG_IN_WASSER. 0.39284837
Best mapping of GLAS_BECHER is GLAS_BECHER. 0.5685132
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_8 is GAS_DIFF_MODELL_6. 0.70448965
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_7 is GAS_DIFF_MODELL_5. 0.7031074
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_4 is GAS_DIFF_MODELL_4. 0.6656246
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_3 is GAS_DIFF_MODELL_3. 0.6836877
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_2 is GAS_DIFF_MODELL_2. 0.7043434
Best mapping of FARB_DIFFUSION_15 is GAS_DIFFUSION_11. 0.675622
Best mapping of FARB_DIFFUSION_14 is GAS_DIFFUSION_10. 0.5700554
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_1 is GAS_DIFF_MODELL_1. 0.7117848
Best mapping of FARB_DIFFUSION_13 is GAS_DIFFUSION_4. 7.7964365E-4
Best mapping of FARB_DIFFUSION_12 is GAS_DIFFUSION_7. 0.66138506
Best mapping of FARB_DIFFUSION_11 is GAS_DIFFUSION_9. 0.68585205
Best mapping of FARB_DIFFUSION_10 is GAS_DIFFUSION_8. 0.68499094
Best mapping of FARB_DIFFUSION_2 is OBJ_GAS_DIFFUSION_6. 0.2021828
Best mapping of FARB_DIFFUSION_1 is OBJ_GAS_DIFFUSION_5. 0.2069435
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_3 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_15. 0.50407565
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_2 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_7. 0.60060686
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_1 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_8. 0.6014572
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_8 is OBJ_GAS_DIFFUSION_16. 0.61294323
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_7 is GAS_DIFF_SIM_13. 7.4640634E-11
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_10.
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_6 is OBJ_GAS_DIFFUSION_6. 0.2021828
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_5 is OBJ_GAS_DIFFUSION_5. 0.2069435
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_4 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_13. -5.124458E-6
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_11.
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_9.

tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_4.
 tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_3.
 Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_3 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_13. -5.124458E-6
 tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_11.
 tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_9.
 tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_4.
 tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_3.
 Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_2 is OBJ_GAS_DIFFUSION_2. 0.39284837
 Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_1 is OBJ_GAS_DIFFUSION_1. 0.3588288
 Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_6 is GAS_DIFF_SIM_9. 0.8147009
 Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_5 is GAS_DIFF_SIM_7. 0.8138293
 Best mapping of OBJ_TEILCHEN is OBJ_TEILCHEN. 0.7117848
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_6 is GAS_DIFFUSION_4. 0.58847797
 Mapping with GAS_DIFFUSION_3 is also possible: 0.32891408
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_8 is GAS_DIFFUSION_6. 0.723356
 Mapping with GAS_DIFFUSION_5 is also possible: 0.22547236
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_3 is GAS_DIFFUSION_1. 0.92383504
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_4 is GAS_DIFFUSION_2. 0.9248484
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_5 is GAS_DIFFUSION_3. 0.58907646
 Mapping with GAS_DIFFUSION_4 is also possible: 0.310319
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_7 is GAS_DIFFUSION_5. 0.707543
 Mapping with GAS_DIFFUSION_6 is also possible: 0.24221677
 Best mapping of OBJ_GLASBECHER is OBJ_GLASBECHER. 0.641624
 Best mapping of OBJ_TEILCHEN_GITTER is OBJ_HINDERNISREIHE_MIT_LUECKEN. 0.6143675
 Mapping with OBJ_TEILCHEN_GITTER is also possible: 0.39020634
 Best mapping of OBJ_GROSSE_TEILCHEN is OBJ_GROSSE_TEILCHEN. 0.8409197
 Best mapping of OBJ_KLEINE_TEILCHEN is OBJ_KLEINE_TEILCHEN. 0.8459953
 Best mapping of OBJ_STOFF is OBJ_STOFF. 0.9168613
 Best mapping of OBJ_EXPERIMENT is OBJ_EXPERIMENT. 0.61403245
 Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_2 is OBJ_SAUERSTOFF. 0.6663762
 Mapping with OBJ_WASSERSTOFF is also possible: 0.46126553
 Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_1 is OBJ_WASSERSTOFF. 0.69010687
 Mapping with OBJ_SAUERSTOFF is also possible: 0.21372542
 Best mapping of OBJ_AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_WASSER. 0.66138506
 Best mapping of OBJ_INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_UNTER_GLASBECHER. 0.88628715
 Best mapping of OBJ_DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is OBJ_TONZYLINDER. 0.7311747
 Mapping with OBJ_TONZYLINDER_MIT_ABLEITUNG_IN_WASSER is also possible: 0.2772618
 Best mapping of OBJ_GLAS_BECHER is OBJ_AUSSERHALB_TONZYLINDER. -1.0585163E-4
 tied with OBJ_INNERHALB_TONZYLINDER.

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Posttestaufgaben

Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```

; DATEI: echo-diffusion-ballgeschichte-nach-simulation
; Autor: Michael Rohr
; *****
(defaults 'echo)
; *****
;(defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
;(setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
;(clear-net)
; *****
; Geschichte
(proposition 'g1_1 "In einer Sportstunde faengt gerade eine Klasse ein Ballspiel an.") ;
(proposition 'g1_2 "Das Spielmaterial des Ballspiels sind Baele") ;
(proposition 'g1_3 "Die Baele sind gross oder klein.") ;
(proposition 'g1_4 "Die Klasse ist in 2 Gruppen geteilt.");
  
```

```
(proposition 'g1_5 "Die erste Gruppe befindet sich in der ersten Haelfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_6 "Die zweite Gruppe befindet sich in der zweiten Haelfte der Sporthalle.") ;
(proposition 'g1_7 "Jede Gruppe hat am Anfang des Spiels genau die gleiche Anzahl von Bae?llen.
") ;
(proposition 'g1_8 "In der Sporthalle ist ein grosses Netz gespannt.")
(proposition 'g1_9 "Das Netz befindet sich in der Mitte der Sporthalle.")
(proposition 'g1_10 "Das Netz reicht von einer Wand zur anderen und nach oben bis zur Hallendecke. ") ;
(proposition 'g1_11 "Das Netz hat Maschen.")
(proposition 'g1_12 "Von den Maschen sind einige groesser und viele kleiner.") ;
(proposition 'g1_13 "Die groesseren Maschen sind gerade so gross wie die groessten Balle.")
(proposition 'g1_14 "Die groessten Baele passen nicht durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_15 "Die kleineren Baele passen durch die groessten Maschen.")
(proposition 'g1_16 "Durch die kleinsten Maschen passt nicht einmal der kleinste Ball.") ;
(proposition 'g1_17 "Die kleineren Baele passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_18 "Die groesseren Baele passen nicht durch die kleinsten Maschen.")
(proposition 'g1_19 "Jede Gruppe vesucht, so viele Baele wie moeglich durch das Netz in die
Spielhaelfte der anderen Gruppe zu werfen.") ;
(proposition 'g1_20 "Die Sportlehrerin pfeift das Spiel an.") ;
(proposition 'g1_21 "Beide Gruppen werfen Baele zum Netz.") ;
(proposition 'g1_22 "Andauernd treffen sich einige Baele.") ;
(proposition 'g1_23 "Die Baele fliegen dann kreuz und quer auf dem Spielfeld herum.") ;
(proposition 'g1_24 "Manche kleinen Baele passen durch die Maschen.")
(proposition 'g1_25 "Einige der groesseren Baele passen nirgendwo hindurch.")
(proposition 'g1_26 "Die kleinen Baele fliegen durch das Netz.")
(proposition 'g1_27 "Die groesseren Baele durchqueren das Netz nicht.")
(proposition 'g1_28 "Die kleinen Baele fliegen fast immer in das Netz.")
(proposition 'g1_29 "Die grossen Baele werden wieder aus dem Netz zurueckgeschleudert.") ;
(proposition 'g1_30 "Nach 10 Minuten beendet die Lehrerin das Spiel.") ;
(proposition 'g1_31 "Alle zusammen zaehlen aus, welche Gruppe die meisten Baele in die Haelfte
der anderen befoerdert hat.") ;
,*****
; Diffusionsexperiment
(proposition 'exp_diffusion_1 "In einem Glasgefass befindet sich Wasser.") ;
(proposition 'exp_diffusion_2 "In einen Dialyseschlauch befindet sich eine Farbstoffloesung mit der
Farbe lila.") ;
(proposition 'exp_diffusion_3 "Im Dialyseschlauch befindet sich eine weitere Farbstoffloesung mit
der Farbe gelb.") ;
(proposition 'exp_diffusion_4 "Das Experiment wird gestartet.") ;
(proposition 'exp_diffusion_5 "Der Dialyseschlauch wird in das Gefass mit dem Wasser gelegt.") ;
(proposition 'exp_diffusion_6 "Der lila Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch.");
(proposition 'exp_diffusion_7 "Der gelbe Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch nicht.");
(proposition 'exp_diffusion_8 "Nach kurzer Zeit bilden sich im Wasser unterhalb des Dialyse-
schlauchs Schlieren.") ;
(proposition 'exp_diffusion_9 "Die Schlieren haben die Farbe lila.")
(proposition 'exp_diffusion_10 "Nach einer Weile erscheint der Dialyseschlauch gelb.") ;
(proposition 'exp_diffusion_11 "Nach einer Weile wird die lila Farbe im Wasser staerker.")
; Modellrelationen des Experiments (werden nach dem Arbeiten mit der Simulation analog zu dem
Experiment zur Simulation angenommen;
(proposition 'exp_diffusion_12 "Alle Stoffe werden als Teilchen dargestellt.")
(proposition 'exp_diffusion_13 "Der violette Farbstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'exp_diffusion_14 "Der gelbe Farbstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'exp_diffusion_15 "Das Material des Dialyseschlauchs ist ein Stoff.")
```

```
(proposition 'exp_diffusion_16 "Der violette Farbstoff wird als aus Teilchen aufgebaut dargestellt.")
;
(proposition 'exp_diffusion_17 "Der gelbe Farbstoff wird als aus Teilchen aufgebaut dargestellt.") ;
(proposition 'exp_diffusion_18 "Der Dialyseschlauch wird als aus kleinsten Teilchen aufgebaut dargestellt.") ;
; Modellrelationen der abhängigen Variable
(proposition 'exp_diffusion_19 "Die kleinen Wasserstoffteilchen dringen durch die Teilchendarstellung des Dialyseschlauchs.")
(proposition 'exp_diffusion_20 "Die grossen Sauerstoffteilchen dringen nicht durch die Teilchendarstellung des Dialyseschlauchs.")
;
.*****
; Erfolgreiche Simulation
(proposition 'simulation_1 "Die Simulation findet auf einem Simulationsfeld statt.") ;
(proposition 'simulation_2 "Es werden kleine Kugeln als Modelle für Sauerstoff auf das Simulationsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_3 "Es werden grosse Kugeln als Modelle für Wasserstoff auf das Simulationsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_4 "Es wird eine Reihe aus Hindernissen mit Luecken auf das Simulationsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_5 "Die Luecken zwischen den einzelnen Hindernissen sind grosser als die kleinen Kugeln") ;
(proposition 'simulation_6 "Die Luecken zwischen den einzelnen Hindernissen sind kleiner als die grossen Kugeln") ;
(proposition 'simulation_7 "Ich starte die Simulation.") ;
(proposition 'simulation_8 "Die Kugeln bewegen sich nach dem Start der Simulation.")
(proposition 'simulation_9 "Die Kugeln prallen ab und zu aufeinander.");
(proposition 'simulation_10 "Die Kugeln aendern dann ihre Bewegungsrichtung.");
(proposition 'simulation_11 "Die kleinen Kugeln passen zwischen den Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_12 "Die grossen Kugeln passen nicht zwischen den Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_13 "Die kleinen Kugeln fliegen durch die Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_14 "Die grossen Kugeln fliegen nicht durch die Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_15 "Ich beende die Simulation. ") ;
(proposition 'simulation_16 "Alle Stoffe werden als Teilchen dargestellt.")
(proposition 'simulation_17 "Wasserstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'simulation_18 "Sauerstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'simulation_19 "Das Material des Tonyzylinders ist ein Stoff.")
(proposition 'simulation_20 "Unter einem Glasgefass befindet sich ein Tonyzylinder mit einem durchbohrten Gummistopfen.") ;
(proposition 'simulation_21 "Aus dem Gummistopfen führt ein Glasrohr in ein Wasserbad");
(proposition 'simulation_22 "Das Experiment wird gestartet.")
(proposition 'simulation_23 "Unter den Glaszylinder wird Wasserstoff geblasen.") ;
(proposition 'simulation_24 "Unter den Glaszylinder wird Sauerstoff geblasen.") ;
(proposition 'simulation_25 "Der Wasserstoff durchquert den Tonyzylinder.");
(proposition 'simulation_26 "Der Sauerstoff durchquert den Tonyzylinder nicht.");
(proposition 'simulation_27 "Wenn Wasserstoff durchgeleitet wird, sprudeln im Wasserbad Gasblasen.");
;
(proposition 'simulation_28 "Wenn Sauerstoff durchgeleitet wird, sprudeln im Wasserbad keine Gasblasen.")
.*****
;
; 1. Erklärungszusammenhänge in der Geschichte: Zwei Erklärungen,
; warum grosse Baele zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz fliegen.
(explain '(g1_20 g1_21 g1_22 g1_23 g1_24) 'g1_26)
(explain '(g1_20 g1_21 g1_22 g1_23 g1_25) 'g1_27)
.*****
;
```

```

; Erklärung des Simulationsexperiments (Wasserstoff-/Sauerstoffdiffusion) auf dem makroskopi-
schen Niveau:
; 1a. Modellbeziehung der unabhängigen Variable: 3 beteiligte Stoffe
; Erklärungs-zusammenhaenge in der Simulation
; Modellbeziehung der Darstellung der 3 beteiligten Stoffe als Teilchen
(explain '(simulation_16 simulation_17) 'simulation_2)
(explain '(simulation_16 simulation_18) 'simulation_3)
(explain '(simulation_16 simulation_19) 'simulation_4)
; 1b. Modellbeziehung der abhängigen Variablen: Durchdringen bzw. Nicht-Durchdringen der Gase
durch den Tonyzylinder
(explain '(simulation_11) 'simulation_25)
(explain '(simulation_12) 'simulation_26)
; 2. Makroskopische Erklärung: Zurückführen der Diffusion (Nichtdiffusion) auf experimentellen
Aufbau
(explain '(simulation_20 simulation_21 simulation_22 simulation_23) 'simulation_25)
(explain '(simulation_20 simulation_21 simulation_22 simulation_24) 'simulation_26)
;*****
; Erklärungs-zusammenhänge in der Simulation
; Erklärungskette, warum Wasserstoffteilchen in einer erfolgreichen Modellierung durch das Teil-
chengitter dringen und Sauerstoffteilchen nicht.
(explain '(simulation_7) 'simulation_8)
(explain '(simulation_5) 'simulation_11)
(explain '(simulation_6) 'simulation_12)
(explain '(simulation_11 simulation_8) 'simulation_13)
(explain '(simulation_12 simulation_8) 'simulation_14)
;*****
; Erklärungs-zusammenhaenge im Test-Experiment
; 1a. Modellbeziehung zur Darstellung der beteiligten Stoffe als Teilchen;
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_13) 'exp_diffusion_16)
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_14) 'exp_diffusion_17)
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_15) 'exp_diffusion_18)
; 1b. Modellbeziehung zum Durchdringen des Dialyseschlauchs durch Wasserstoffs bzw. Nicht-
durchdringen des Sauerstoffs
(explain '(exp_diffusion_19) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_20) 'exp_diffusion_7)
; 2. Erklärung auf dem makroskopischen Niveau: Zurückführen der Diffusion (Nichtdiffusion) auf
experimentellen Aufbau
(explain '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_7)
;*****
; Analogien
; 1. Erklärungsanalogien zwischen Geschichte und Posttest-Experiment
; Diese Erklärungsanalogien wurden durch den ersten ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen
Experiment und Geschichte bestimmt. (siehe dort)
; Die Analogie wurde durch den ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen Experiment und Ge-
schichte bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g1_21 exp_diffusion_5) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_21 exp_diffusion_5) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g1_20 exp_diffusion_4) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_20 exp_diffusion_4) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g1_24 exp_diffusion_2) '(g1_26 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g1_25 exp_diffusion_3) '(g1_27 exp_diffusion_7) )
;*****
; 2. Erklärungsanalogien zwischen Geschichte und Lernphasen-Experiment

```

```

; a. Das Werfen der Bälle ist analog dem Blasen von Wasserstoff bzw. Sauerstoff unter den Glas-
becher
(analogous '(g1_21 simulation_23) '(g1_26 simulation_25) )
(analogous '(g1_21 simulation_24) '(g1_27 simulation_26) )
; b. Der Start des Spiels durch die Lehrerin ist analog dem Start des Experiments
(analogous '(g1_20 simulation_22) '(g1_26 simulation_25) )
(analogous '(g1_20 simulation_22) '(g1_27 simulation_26) )
;*****
; Erklärungsanalogien zwischen dem bereits simulierten Experiment der Lernphase und Testaufgaben-
Experiment
; Auch hier wurden Erklärungsanalogien durch einen ACME-Lauf bestimmt.
; 1. Die Modellrelationen der unabhängigen Variablen der beiden zugrundeliegenden Experimenten
sind analog
; Das gilt also für die beiden Farbstoffe und den Dialyseschlauch vs. die beiden Gase und den
Tonzyylinder
; 1a. Die Teilchendarstellung von Wasserstoff im Experiment zur Simulation
; ist analog zur Teilchendarstellung des violettten Farbstoffs in der Testaufgabe
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_2 exp_diffusion_16) )
(analogous '(simulation_17 exp_diffusion_13) '(simulation_2 exp_diffusion_16) )
; 1b. Entsprechende Analogie zwischen Sauerstoff und gelbem Farbstoff
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_3 exp_diffusion_17) )
(analogous '(simulation_18 exp_diffusion_14) '(simulation_3 exp_diffusion_17) )
; 1c. Und auch für den Tonzyylinder bzw. den Dialyseschlauch
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_4 exp_diffusion_18) )
(analogous '(simulation_19 exp_diffusion_15) '(simulation_4 exp_diffusion_18) )
; 1d. Es müssen auch für die beiden Erklärungsziele der abhängigen Variable Modellrelationen
angegeben werden.
; Analogie für die Modelldarstellung des 1. Erklärungsziels, das Durchdringen von Wasserstoff vs.
violetttem Farbstoff
(analogous '(simulation_11 exp_diffusion_19) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
; Erklärungsanalogie für die Modelldarstellung des 1. Erklärungsziels, das Durchdringen von Was-
serstoff vs. violetttem Farbstoff
(analogous '(simulation_12 exp_diffusion_20) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
; 2. Es gelten auch Erklärungsanalogien auf der makroskopischen Ebene der Experimente
(analogous '(simulation_22 exp_diffusion_4) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
(analogous '(simulation_22 exp_diffusion_4) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
(analogous '(simulation_23 exp_diffusion_2) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
(analogous '(simulation_24 exp_diffusion_3) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
; 3. Disanalogien
; Die Erklärung der Ballbewegung in der Geschichte ist eine andere als die Erklärung der Teil-
chenbewegung in der Simulation
(disanalogous '(simulation_7 g1_20) '(simulation_8 g1_26) )
(disanalogous '(simulation_7 g1_20) '(simulation_8 g1_27) )
;*****
; Als evident angenommen werden die Propositionen über die beiden Experimente sowie die Aus-
sage, dass alle Stoffe aus Teilchen bestehen
(data '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5 exp_diffusion_6
exp_diffusion_7 exp_diffusion_8 exp_diffusion_9 exp_diffusion_10 exp_diffusion_11 simulation_2 si-
mulation_15 simulation_24 simulation_25 simulation_26 simulation_27 simulation_28 simulation_29
simulation_30 simulation_31 simulation_32 simulation_30))
(gross_on)
(run_exp)
(exit)

```

Ergebnis des ECHO-Laufs

Test: TEST0 Total times: 109

NIL

Units not yet reached asymptote: 1

Explanatory coherence of system is: 3.032129

patched print_run

Test: TEST0 Total times: 110

NIL

Units not yet reached asymptote: 1

Explanatory coherence of system is: 3.032129

Total times: 110

EXP_DIFFUSION_1 has activation: 0.77911115
EXP_DIFFUSION_10 has activation: 0.65999985
EXP_DIFFUSION_11 has activation: 0.65999985
EXP_DIFFUSION_12 has activation: 0.8014698
EXP_DIFFUSION_13 has activation: 0.56226444
EXP_DIFFUSION_14 has activation: 0.5569488
EXP_DIFFUSION_15 has activation: 0.5569488
EXP_DIFFUSION_16 has activation: 0.68729997
EXP_DIFFUSION_17 has activation: 0.65979886
EXP_DIFFUSION_18 has activation: 0.65979886
EXP_DIFFUSION_19 has activation: 0.6017978
EXP_DIFFUSION_2 has activation: 0.797362
EXP_DIFFUSION_20 has activation: 0.6018084
EXP_DIFFUSION_3 has activation: 0.8014707
EXP_DIFFUSION_4 has activation: 0.8705182
EXP_DIFFUSION_5 has activation: 0.8327269
EXP_DIFFUSION_6 has activation: 0.88616407
EXP_DIFFUSION_7 has activation: 0.8861882
EXP_DIFFUSION_8 has activation: 0.65999985
EXP_DIFFUSION_9 has activation: 0.65999985
G1_1 has activation: 3.5448345E-5
G1_10 has activation: 3.5448345E-5
G1_11 has activation: 3.5448345E-5
G1_12 has activation: 3.5448345E-5
G1_13 has activation: 3.5448345E-5
G1_14 has activation: 3.5448345E-5
G1_15 has activation: 3.5448345E-5
G1_16 has activation: 3.5448345E-5
G1_17 has activation: 3.5448345E-5
G1_18 has activation: 3.5448345E-5
G1_19 has activation: 3.5448345E-5
G1_2 has activation: 3.5448345E-5
G1_20 has activation: 0.99
G1_21 has activation: 0.8135872
G1_22 has activation: 0.59934556
G1_23 has activation: 0.59934556
G1_24 has activation: 0.60380995
G1_25 has activation: 0.6044289
G1_26 has activation: 0.828527
G1_27 has activation: 0.82855165
G1_28 has activation: 3.5448345E-5
G1_29 has activation: 3.5448345E-5
G1_3 has activation: 3.5448345E-5
G1_30 has activation: 3.5448345E-5
G1_31 has activation: 3.5448345E-5
G1_4 has activation: 3.5448345E-5
G1_5 has activation: 3.5448345E-5

G1_6 has activation: 3.5448345E-5
G1_7 has activation: 3.5448345E-5
G1_8 has activation: 3.5448345E-5
G1_9 has activation: 3.5448345E-5
SIMULATION_1 has activation: 3.5448345E-5
SIMULATION_10 has activation: 3.5448345E-5
SIMULATION_11 has activation: 0.66585964
SIMULATION_12 has activation: 0.6659032
SIMULATION_13 has activation: 0.26793933
SIMULATION_14 has activation: 0.26795402
SIMULATION_15 has activation: 0.65999985
SIMULATION_16 has activation: 0.8033327
SIMULATION_17 has activation: 0.57062757
SIMULATION_18 has activation: 0.5571049
SIMULATION_19 has activation: 0.5571049
SIMULATION_2 has activation: 0.79440653
SIMULATION_20 has activation: 0.5980206
SIMULATION_21 has activation: 0.5980206
SIMULATION_22 has activation: 0.8285373
SIMULATION_23 has activation: 0.6932378
SIMULATION_24 has activation: 0.804614
SIMULATION_25 has activation: 0.8756865
SIMULATION_26 has activation: 0.87605506
SIMULATION_27 has activation: 3.5448345E-5
SIMULATION_28 has activation: 0.65999985
SIMULATION_3 has activation: 0.65989006
SIMULATION_4 has activation: 0.65989006
SIMULATION_5 has activation: 0.3944344
SIMULATION_6 has activation: 0.39445195
SIMULATION_7 has activation: -0.7512872
SIMULATION_8 has activation: 0.11980796
SIMULATION_9 has activation: 3.5448345E-5

A.2.2.2 Gruppe, die die Fischgeschichte las

ACME- Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Fischgeschichte und Experiment zur Diffusion des Prättests

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-diffusion-fisch-prae.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
(defun make_struc1 ()
  (make_struc 'makroskopisches_fisch_modell
'sentence
'(all
 (
  (see (obj_see) obj_fischen_1)
  (morgen (obj_morgen) obj_fischen_2)
  (fischerboot (obj_fischerboot) obj_fischen_3)
  (fische (obj_fische) obj_fischen_4)
  (grosse_fische (obj_grosse_fische) obj_fischen_5)
  (kleine_fische (obj_kleine_fische) obj_fischen_6)
  (karpfen (obj_karpfen) obj_fischen_7)
  (rotaugen (obj_rotaugen) obj_fischen_8)
  (fischerin (obj_fischerin) obj_fischen_9)
  (netz (obj_netz) obj_fischen_10)
```

```

(maschen (obj_maschen) obj_fischen_11)
(kleine_fische (obj_kleine_fische) obj_fischen_12)
(bitterling (obj_bitterling) obj_fischen_13)
(stichling (obj_stichling) obj_fischen_14)
(land (obj_land) obj_fischen_15)
(fischhaendler (obj_fischhaendler) obj_fischen_16)
(fahren (obj_fischerboot obj_see) fischen_1)
(tageszeit (obj_morgen) fischen_2)
(ziel (obj_fischerboot obj_fische) fischen_3)
(fangen_wollen (obj_fischerin obj_grosse_fische) fischen_4)
(beispiel_grosse_fische (obj_karpfen obj_rotaugen) fischen_6)
(legen (obj_fischerin obj_netz) fischen_7)
(schwimmen (obj_fische obj_netz) fischen_8)
(enthalten (obj_netz obj_maschen) fischen_9)
(nicht_durchpassen (obj_grosse_fische obj_maschen) fischen_10)
(nicht_entkommen (obj_grosse_fische obj_netz) fischen_11)
(gefangen_bleiben (obj_karpfen) fischen_12)
(beispiel_kleine_fische (obj_bitterling obj_stichling) fischen_13)
(durchpassen (obj_kleine_fische obj_maschen) fischen_14)
(entkommen (obj_kleine_fische obj_netz) fischen_15)
(verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_13 fischen_14) fischen_16)
(verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_10 fischen_11) fischen_17)
(kollidieren (obj_karpfen) fischen_18)
(aendern_bewegungsrichtung (obj_karpfen) fischen_19)
(verursachen (fischen_7 fischen_8 fischen_18 fischen_19) fischen_20)
(prallen (obj_karpfen obj_netz) fischen_21)
(einziehen (obj_fischerin obj_netz) fischen_22)
(fahren (obj_boot obj_land) fischen_23)
(bringen (obj_fischerin obj_grosse_fische obj_fischhaendler) fischen_24)
(verkaufen (obj_fischerin obj_grosse_fische) fischen_25)
) ) ) )
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch
'sentence
'(all
(
(glas_becher (obj_glas_becher) diffusionobj_1)
(dialyse_schlauch_mit_Wasser (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusionobj_2)
(innerhalb_dialyse_schlauch (obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusionobj_3)
(ausserhalb_dialyse_schlauch (obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) diffusionobj_4)
(farbstoff_1 (obj_farbstoff_1) diffusionobj_5)
(farbstoff_2 (obj_farbstoff_2) diffusionobj_6)
(experiment (obj_experiment) diffusionobj_7)
(violett (obj_farbstoff_1) diffusion_1)
(gelb (obj_farbstoff_2) diffusion_2)
(starten (obj_experimentator obj_experiment) diffusion_3)
(legen (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_glasbecher) diffusion_4)
(sich_befinden (obj_farbstoff_1 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_5)
(sich_befinden (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_6)
(durchqueren (obj_farbstoff_1 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusion_7)
(nicht_durchqueren (obj_farbstoff_2 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) diffusion_8)
; Dass das Experiment damit beginnt, dass der Dialyseschlauch in den Becher gelegt wird,
; und der Schlauch danach im Becher liegt,

```

```

; und dass sich der violette Farbstoff im Dialyseschlauch befindet,
; wird als (rein beschreibende) Ursache dafür gesehen, dass der violette Farbstoff den Schlauch
durchquert.
(verursachen (diffusion_3 diffusion_4 diffusion_5 diffusion_7) diffusion_10)
; Dass das Experiment damit beginnt, dass der Dialyseschlauch in den Becher gelegt wird,
; und der Schlauch danach im Becher liegt,
; und dass sich der gelb Farbstoff im Dialyseschlauch befindet,
; wird als (rein beschreibende) Ursache dafür gesehen, dass der gelbe Farbstoff den Schlauch nicht
durchquert.
(verursachen (diffusion_3 diffusion_4 diffusion_6 diffusion_8) diffusion_11)
(gelangen (obj_farbstoff_1 obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) diffusion_12)
(bleiben (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) diffusion_13)
) ) )
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "makroskopisches_fischmodell_makroskopische_farbstoffosmose")
  (similar 'dialyse_schlauch_mit_wasser 'netz.2)
  (similar 'durchqueren 'entkommen.2)
  (similar 'nicht_durchqueren 'nicht_entkommen.2)
  (constraint_map 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch 'makroskopisches_fisch_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)

```

Ergebnis des ACME-Laufs

```

Network has settled by cycle 66.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 67
makroskopisches_fischmodell_makroskopische_farbstoffosmose
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 5.5494776
Calculating the best mappings after 67 cycles.
Best mapping of BLEIBEN is ENTHALTEN. 0.5873732
Best mapping of GELANGEN is DURCHPASSEN. 0.27814484
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.93726426
Best mapping of NICHT_DURCHQUEREN is NICHT_ENTKOMMEN. 0.800655
Best mapping of DURCHQUEREN is ENTKOMMEN. 0.76970875
Best mapping of SICH_BEFINDEN is NICHT_DURCHPASSEN. 0.67315495
Best mapping of LEGEN is SCHWIMMEN. 0.48418754
Best mapping of STARTEN is LEGEN. 0.65112424
Best mapping of GELB is GROSSE_FISCHE. 0.23752204
Best mapping of VIOLETT is KLEINE_FISCHE. 0.35285354
Best mapping of EXPERIMENT is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. -4.3548178E-5
tied with KOLLIDIEREN.
tied with GEFANGEN_BLEIBEN.
tied with TAGESZEIT.
tied with FISCHHAENDLER.
tied with LAND.
tied with STICHLING.
tied with BITTERLING.
tied with FISCHERIN.
tied with ROTAUGEN.

```

tied with KARPFFEN.
tied with FISCHE.
tied with FISCHERBOOT.
tied with MORGEN.
tied with SEE.
Best mapping of FARBSTOFF_2 is GROSSE_FISCHE. 0.23752204
Best mapping of FARBSTOFF_1 is KLEINE_FISCHE. 0.35285354
Best mapping of AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. -
4.3548178E-5
tied with KOLLIDIEREN.
tied with GEFANGEN_BLEIBEN.
tied with TAGESZEIT.
tied with FISCHHAENDLER.
tied with LAND.
tied with STICHLING.
tied with BITTERLING.
tied with FISCHERIN.
tied with ROTAUGEN.
tied with KARPFFEN.
tied with FISCHE.
tied with FISCHERBOOT.
tied with MORGEN.
tied with SEE.
Best mapping of INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is MASCHEN. 0.58737403
Best mapping of DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is NETZ. 0.7558713
Best mapping of GLAS_BECHER is AENDERN_BEWEGUNGSRICHTUNG. -4.3548178E-5
tied with KOLLIDIEREN.
tied with GEFANGEN_BLEIBEN.
tied with TAGESZEIT.
tied with FISCHHAENDLER.
tied with LAND.
tied with STICHLING.
tied with BITTERLING.
tied with FISCHERIN.
tied with ROTAUGEN.
tied with KARPFFEN.
tied with FISCHE.
tied with FISCHERBOOT.
tied with MORGEN.
tied with SEE.
Best mapping of DIFFUSION_13 is FISCHEN_9. 0.5873732
Best mapping of DIFFUSION_12 is FISCHEN_15. 0.4540494
Best mapping of DIFFUSION_11 is FISCHEN_17. 0.6455024
Mapping with FISCHEN_20 is also possible: 0.24650706
Best mapping of DIFFUSION_10 is FISCHEN_16. 0.6363409
Mapping with FISCHEN_20 is also possible: 0.24286063
Best mapping of DIFFUSION_2 is OBJ_FISCHEN_5. 0.23752204
Best mapping of DIFFUSION_1 is OBJ_FISCHEN_12. 0.17335361
tied with OBJ_FISCHEN_6.
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_7 is FISCHEN_12. -4.5670397E-5
tied with FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_16.
tied with OBJ_FISCHEN_15.
tied with OBJ_FISCHEN_14.
tied with OBJ_FISCHEN_13.
tied with OBJ_FISCHEN_9.
tied with OBJ_FISCHEN_8.
tied with OBJ_FISCHEN_7.

tied with OBJ_FISCHEN_4.
tied with OBJ_FISCHEN_3.
tied with OBJ_FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_1.
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_6 is OBJ_FISCHEN_5. 0.23752204
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_5 is OBJ_FISCHEN_12. 0.17335361
tied with OBJ_FISCHEN_6.
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_4 is FISCHEN_12. -4.5670397E-5
tied with FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_16.
tied with OBJ_FISCHEN_15.
tied with OBJ_FISCHEN_14.
tied with OBJ_FISCHEN_13.
tied with OBJ_FISCHEN_9.
tied with OBJ_FISCHEN_8.
tied with OBJ_FISCHEN_7.
tied with OBJ_FISCHEN_4.
tied with OBJ_FISCHEN_3.
tied with OBJ_FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_1.
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_3 is OBJ_FISCHEN_11. 0.58737403
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_2 is OBJ_FISCHEN_10. 0.5814657
Best mapping of DIFFUSIONOBJ_1 is FISCHEN_12. -4.5670397E-5
tied with FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_16.
tied with OBJ_FISCHEN_15.
tied with OBJ_FISCHEN_14.
tied with OBJ_FISCHEN_13.
tied with OBJ_FISCHEN_9.
tied with OBJ_FISCHEN_8.
tied with OBJ_FISCHEN_7.
tied with OBJ_FISCHEN_4.
tied with OBJ_FISCHEN_3.
tied with OBJ_FISCHEN_2.
tied with OBJ_FISCHEN_1.
Best mapping of DIFFUSION_6 is FISCHEN_10. 0.66800773
Mapping with FISCHEN_18 is also possible: 0.25329006
Best mapping of DIFFUSION_8 is FISCHEN_11. 0.7283327
Mapping with FISCHEN_19 is also possible: 0.2249415
Best mapping of DIFFUSION_3 is FISCHEN_7. 0.93900555
Best mapping of DIFFUSION_4 is FISCHEN_8. 0.9358948
Best mapping of DIFFUSION_5 is FISCHEN_13. 0.56142974
Mapping with FISCHEN_18 is also possible: 0.20180167
Best mapping of DIFFUSION_7 is FISCHEN_14. 0.6652248
Mapping with FISCHEN_19 is also possible: 0.22075301
Best mapping of OBJ_GLASBECHER is OBJ_LAND. -1.9597285E-4
tied with OBJ_ROT AUGEN.
tied with OBJ_SEE.
Best mapping of OBJ_EXPERIMENTATOR is OBJ_FISCHERIN. 0.6801441
Best mapping of OBJ_EXPERIMENT is OBJ_NETZ. 0.3029127
Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_2 is OBJ_GROSSE_FISCHE. 0.8530672
Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_1 is OBJ_KLEINE_FISCHE. 0.84723413
Best mapping of OBJ_AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_ROT AUGEN. -2.8155058E-5
Best mapping of OBJ_INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_MASCHEN. 0.871472
Best mapping of OBJ_DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is OBJ_NETZ. 0.66648763
Best mapping of OBJ_GLAS_BECHER is OBJ_MORGEN. -2.8734983E-5

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Prätetaufgabe

Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```

; datei: echo-diffusion-fisch-vor-simulation
; autor: Michael Rohr
; *****
;
; (defaults 'echo)
; *****
;
; (defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
; (setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
; (clear-net)
; *****
;
; Geschichte
; (proposition 'g2_1 "Ein Boot fährt auf den See hinaus.") ;
; (proposition 'g2_2 "Es ist früher Morgen.")
; (proposition 'g2_3 "Das Boot fährt zum Fischen.") ;
; (proposition 'g2_4 "Die Fischerin will grosse Fische fangen.") ;
; (proposition 'g2_5 "Grosse Fische sind zum Beispiel Karpfen und Rotaugen.") ;
; (proposition 'g2_6 "Sie legt ein Netz.")
; (proposition 'g2_7 "Das Netz hat Maschen.")
; (proposition 'g2_7a "Die Fische schwimmen in das Netz.")
; (proposition 'g2_8 "Die Maschen sind kleiner als die Karpfen.") ;
; (proposition 'g2_9 "Wenn die Karpfen in das Netz geraten, können sie deshalb mehr nicht durch
; die Maschen hindurch ins freie Wasser entkommen.")
; (proposition 'g2_10 "Die Karpfen bleiben gefangen.") ;
; (proposition 'g2_11 "In der Enge prallen sie gegeneinander.") ;
; (proposition 'g2_12 "Sie ändern dabei immer wieder ihre Schwimmrichtung.") ;
; (proposition 'g2_13 "Aber es gibt auch noch kleine Fische im See.")
; (proposition 'g2_14 "Kleine Fischen sind zum Beispiel Bitterlinge und Stichlinge.")
; (proposition 'g2_15 "Diese kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
; (proposition 'g2_16 "Sie entkommen wieder in den See.") ;
; (proposition 'g2_17 "Die Fischerin zieht das Netz langsam enger..")
; (proposition 'g2_18 "Die kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
; (proposition 'g2_19 "Die kleinen Fische entkommen in den See.")
; (proposition 'g2_20 "Schliesslich zieht die Fischerin das Netz ein.")
; (proposition 'g2_21 "Sie steuert das Boot wieder an Land.") ;
; (proposition 'g2_22 "Gegen Mittag bringt die Fischerin ihren Fang zu den Fischhändlern.") ;
; (proposition 'g2_23 "Sie verkauft die Karpfen.") ;
; *****
;
; Diffusionsexperiment
; (proposition 'exp_diffusion_1 "In einem Glasgefäss befindet sich Wasser.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_2 "In einen Dialyseschlauch befindet sich eine Farbstoffloesung mit der
; Farbe lila.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_3 "Im Dialyseschlauch befindet sich eine weitere Farbstoffloesung mit
; der Farbe gelb.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_4 "Das Experiment wird gestartet.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_5 "Der Dialyseschlauch wird in das Gefäss mit dem Wasser gelegt.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_6 "Der lila Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch.");
; (proposition 'exp_diffusion_7 "Der gelbe Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch nicht.");
; (proposition 'exp_diffusion_8 "Nach kurzer Zeit bilden sich im Wasser unterhalb des Dialyse-
; schlauchs Schlieren.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_9 "Die Schlieren haben die Farbe lila.")
; (proposition 'exp_diffusion_10 "Nach einer Weile erscheint der Dialyseschlauch gelb.") ;
; (proposition 'exp_diffusion_11 "Nach einer Weile wird die lila Farbe im Wasser staerker.")

```

```

;*****
; Erklärungen in der Geschichte
; 1. Zwei Erklärungen, warum grosse Fische zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_7a g2_15) 'g2_16)
(explain '(g2_6 g2_7a g2_8) 'g2_10)
; 2. Erklärung, warum die grossen Fischen im Netz hin und her schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_7a g2_11) 'g2_12)
;*****
; Erklaerungszusammenhaenge im Experiment
(explain '(exp_diffusion_2 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_7)
;*****
; Analogien
(analogous '(g2_6 exp_diffusion_5) '(g2_16 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_6 exp_diffusion_5) '(g2_10 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g2_7a exp_diffusion_4) '(g2_16 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_7a exp_diffusion_4) '(g2_10 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g2_15 exp_diffusion_2) '(g2_16 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_8 exp_diffusion_3) '(g2_10 exp_diffusion_7) )
;*****
(data '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5 exp_diffusion_7
exp_diffusion_7 exp_diffusion_8 exp_diffusion_9 exp_diffusion_10 exp_diffusion_11))
(gross_on)
(run_exp)

Ergebnis des ECHO-Laufs
Network has settled by cycle 60.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 61
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 1.0331346
Total times: 61
EXP_DIFFUSION_1 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_10 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_11 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_2 has activation: 0.7647755
EXP_DIFFUSION_3 has activation: 0.7670034
EXP_DIFFUSION_4 has activation: 0.82894117
EXP_DIFFUSION_5 has activation: 0.82894117
EXP_DIFFUSION_6 has activation: 0.74374735
EXP_DIFFUSION_7 has activation: 0.86763084
EXP_DIFFUSION_8 has activation: 0.65996784
EXP_DIFFUSION_9 has activation: 0.65996784
G2_1 has activation: 4.3766276E-4
G2_10 has activation: 0.7606988
G2_11 has activation: 0.37579006
G2_12 has activation: 0.37579006
G2_13 has activation: 4.3766276E-4
G2_14 has activation: 4.3766276E-4
G2_15 has activation: 0.5969173
G2_16 has activation: 0.73882
G2_17 has activation: 4.3766276E-4

```

G2_18 has activation: 4.3766276E-4
 G2_19 has activation: 4.3766276E-4
 G2_2 has activation: 4.3766276E-4
 G2_20 has activation: 4.3766276E-4
 G2_21 has activation: 4.3766276E-4
 G2_22 has activation: 4.3766276E-4
 G2_23 has activation: 4.3766276E-4
 G2_3 has activation: 4.3766276E-4
 G2_4 has activation: 4.3766276E-4
 G2_5 has activation: 4.3766276E-4
 G2_6 has activation: 0.77360475
 G2_7 has activation: 4.3766276E-4
 G2_7A has activation: 0.77360475
 G2_8 has activation: 0.59880185
 G2_9 has activation: 4.3766276E-4

ACME-Lauf zur Simulation des Analogie-Mappings zwischen Fischgeschichte und erfolgreicher Simulation der Diffusion in der Lernphase

Eingabedatei für den ACME-Lauf

```
;datei: acme-diffusion-ball-simulation.lisp
;autor: michael rohr
(defaults 'acme)
;problem 1: Simulation
(defun make_struc1 ()
  (make_struc 'erfolgreiches_gas_diffusions_simulations_modell
    'sentence
    '(all
      (
        ; Objekte des zugrundeliegenden Experiments, der gas_diffusion durch einen Tonzylinder
        (glas_becher (obj_glasbecher) obj_gas_diffusion_1)
        (tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser (obj_tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser) obj_gas_diffusion_2)
        (innerhalb_tonzylinder (obj_innerhalb_tonzylinder) obj_gas_diffusion_3)
        (ausserhalb_tonzylinder (obj_ausserhalb_tonzylinder) obj_gas_diffusion_4)
        (wasserstoff (obj_wasserstoff) obj_gas_diffusion_5)
        (sauerstoff (obj_sauerstoff) obj_gas_diffusion_6)
        ; Objekte der Simulation
        (grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_gas_diff_sim_7)
        (kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_gas_diff_sim_8)
        (simulationsfeld (obj_simulationsfeld) obj_gas_diff_sim_9)
        (gas_diffusion_simulation (obj_gas_diffusion_simulation) obj_gas_diff_sim_10)
        (teilchen (obj_teilchen) obj_gas_diff_sim_11)
        (hindernisreihen_luecken (obj_hindernisreihen_luecken) obj_gas_diff_sim_13)
        (hindernisreihe_mit_luecken (obj_hindernisreihe_mit_luecken) obj_gas_diff_sim_14)
        (teilchen_gitter (obj_teilchen_gitter) obj_gas_diff_sim_15)
        ; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
        (stoff (obj_stoff) obj_gas_diffusion_15)
        ; Propositionen, die das zugehörige Experiment der gas_diffusion durch Ton beschreiben
        (starten (obj_experiment) gas_diffusion_1)
        (montieren_unter (obj_tonzylinder_mit_ableitung_in_wasser obj_glasbecher) gas_diffusion_2)
        (leiten (obj_wasserstoff obj_unter_glasbecher) gas_diffusion_3)
        (leiten (obj_sauerstoff obj_unter_glasbecher) gas_diffusion_4)
        (durchqueren (obj_wasserstoff obj_tonzylinder) gas_diffusion_5)
        (nicht_durchqueren (obj_sauerstoff obj_tonzylinder) gas_diffusion_6)
```

```

(sprudeln (obj_wasserstoff obj_wasser) gas_diffusion_7)
(verursachen (gas_diffusion_1 gas_diffusion_2 gas_diffusion_3 gas_diffusion_5) gas_diffusion_8)
(verursachen (gas_diffusion_1 gas_diffusion_2 gas_diffusion_4 gas_diffusion_6) gas_diffusion_9)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind und direkte Implika-
tionen
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) gas_diff_modell_1)
(ist_ein (obj_wasserstoff obj_stoff) gas_diffusion_10)
(ist_ein (obj_sauerstoff obj_stoff) gas_diffusion_11)
; Propositionen der Erklärung durch die Simulation
(dargestellt_als (obj_wasserstoff obj_kleine_teilchen) gas_diff_modell_2)
(dargestellt_als (obj_wasserstoff obj_grosse_teilchen) gas_diff_modell_3)
(dargestellt_als (obj_tonzylinder obj_teilchen_gitter) gas_diff_modell_4)
(stattfinden (obj_diff_sim obj_simulationsfeld) gas_diff_sim_1)
(starten (obj_gas_diffusion_simulation) gas_diff_sim_2)
(bewegen_sich (obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen) gas_diff_sim_3)
(bestehen_aus (obj_simulation obj_grosse_teilchen obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken)
gas_diff_sim_4)
(enthalten (hindernisreihe_mit_luecken obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_5)
(hindurch_passen (obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_6)
(durchqueren (obj_kleine_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken) gas_diff_sim_7)
(nicht_hindurch_passen (obj_grosse_teilchen obj_hindernisreihen_luecken) gas_diff_sim_8)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_teilchen obj_hindernisreihe_mit_luecken) gas_diff_sim_9)
(verursachen (gas_diff_sim_2 gas_diff_sim_3) gas_diff_sim_10)
(verursachen (gas_diff_sim_3 gas_diff_sim_6 gas_diff_sim_7) gas_diff_sim_11)
(verursachen (gas_diff_sim_3 gas_diff_sim_8 gas_diff_sim_9) gas_diff_sim_12)
(beenden (obj_gas_diffusion_simulation) gas_diff_sim_13)
(dargestellt_als (gas_diffusion_5 gas_diff_sim_7) gas_diff_modell_5)
(dargestellt_als (gas_diffusion_6 gas_diff_sim_9) gas_diff_modell_6)
))))
(defun make_struc2 ()
(make_struc 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch
'sentence
'(all
(
(glas_becher (obj_glas_becher) obj_farb_diffusion_1)
(dialyse_schlauch_mit_Wasser (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) obj_farb_diffusion_2)
(innerhalb_dialyse_schlauch (obj_innerhalb_dialyse_schlauch) obj_farb_diffusion_3)
(ausserhalb_dialyse_schlauch (obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) obj_farb_diffusion_4)
(farbstoff_1 (obj_farbstoff_1) obj_farb_diffusion_5)
(farbstoff_2 (obj_farbstoff_2) obj_farb_diffusion_6)
(experiment (obj_experiment) obj_farb_diffusion_7)
; Objekte, die durch die Instruktion des Versuchsleiters bekannt sind
(stoff (obj_stoff) obj_farb_diffusion_8)
(kleine_teilchen (obj_kleine_teilchen) obj_farb_diff_modell_1)
(grosse_teilchen (obj_grosse_teilchen) obj_farb_diff_modell_2)
(teilchen_gitter (obj_teilchen_gitter) obj_farb_diff_modell_3)
(violett (obj_farbstoff_1) farb_diffusion_1)
(gelb (obj_farbstoff_2) farb_diffusion_2)
(starten (obj_experiment) farb_diffusion_3)
(legen (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_glasbecher) farb_diffusion_4)
(sich_befinden (obj_farbstoff_1 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_5)
(sich_befinden (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_6)
(durchqueren (obj_farbstoff_1 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) farb_diffusion_7)

```

```
(nicht_durchqueren (obj_farbstoff_2 obj_dialyse_schlauch_mit_wasser) farb_diffusion_8)
(verursachen (farb_diffusion_3 farb_diffusion_4 farb_diffusion_5 farb_diffusion_7) farb_diffusion_10)
(verursachen (farb_diffusion_3 farb_diffusion_4 farb_diffusion_6 farb_diffusion_8) farb_diffusion_11)
(gelangen (obj_farbstoff_1 obj_ausserhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_12)
(bleiben (obj_farbstoff_2 obj_innerhalb_dialyse_schlauch) farb_diffusion_13)
; Propositionen, die durch die Instruktion des Versuchsleiters nach dem Arbeiten mit der Model-
lierungsumgebung übertragen worden sind
; Ohne diese einfachen Übertragungen bzw. ohne dass die SchülerIn bemerkt, dass die Aussagen
auch für die Testaufgabe gelten,
; kann ACME keine Analogien zwischen den beiden Fällen feststellen und damit letztlich ECHO
die analoge Problemlösung auch nicht nutzen.
(dargestellt_als (obj_stoff obj_teilchen) farb_diff_modell_1)
(ist_ein (obj_farbstoff_1 obj_stoff) farb_diffusion_14)
(ist_ein (obj_farbstoff_2 obj_stoff) farb_diffusion_15)
(dargestellt_als (obj_farbstoff_1 obj_kleine_teilchen) farb_diff_modell_2)
(dargestellt_als (obj_farbstoff_2 obj_grosse_teilchen) farb_diff_modell_3)
(dargestellt_als (obj_dialyse_schlauch_mit_wasser obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_4)
(durchqueren (obj_kleine_teilchen obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_5)
(nicht_durchqueren (obj_grosse_teilchen obj_teilchen_gitter) farb_diff_modell_6)
(dargestellt_als (farb_diffusion_7 farb_diff_modell_5) farb_diff_modell_7)
(dargestellt_als (farb_diffusion_8 farb_diff_modell_6) farb_diff_modell_8)
))))
(defun acme ()
  (clear_net)
  (make_struc1)
  (make_struc2)
  (setq experiment "farbstoffdiff_sim")
  (constraint_map 'farbstoffdiffusion_durch_dialyseschlauch 'erfolgreiches_gas_diffusions_simulations_modell)
  (acme-mode)
  (wtp '(500))
  (run_hyp_net 'acme)
)
(acme)
```

Ergebnis des ACME-Laufs

```
Network has settled by cycle 80.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 81
farbstoffdiff_sim
Units not yet reached asymptote: 0
Goodness of network: 9.629838
Calculating the best mappings after 81 cycles.
Best mapping of IST_EIN is IST_EIN. 0.88059336
Best mapping of DARGESTELLT_ALS is DARGESTELLT_ALS. 0.9297026
Best mapping of BLEIBEN is LEITEN. 0.24856426
Best mapping of GELANGEN is SPRUDELN. 0.66200215
Best mapping of VERURSACHEN is VERURSACHEN. 0.92234445
Best mapping of NICHT_DURCHQUEREN is NICHT_DURCHQUEREN. 0.8348988
Best mapping of DURCHQUEREN is DURCHQUEREN. 0.8190445
Best mapping of SICH_BEFINDEN is LEITEN. 0.7678942
Best mapping of LEGEN is MONTIEREN_UNTER. 0.6415995
Best mapping of STARTEN is STARTEN. 0.70937574
Best mapping of GELB is SAUERSTOFF. 0.20260711
Best mapping of VIOLETT is WASSERSTOFF. 0.20782092
Best mapping of TEILCHEN_GITTER is TEILCHEN_GITTER. 0.646791
```

Best mapping of GROSSE_TEILCHEN is GROSSE_TEILCHEN. 0.7014914
Best mapping of KLEINE_TEILCHEN is KLEINE_TEILCHEN. 0.7020052
Best mapping of STOFF is STOFF. 0.7076223
Best mapping of EXPERIMENT is BEENDEN. 4.1252213E-10
tied with GAS_DIFFUSION_SIMULATION.
Best mapping of FARBSTOFF_2 is SAUERSTOFF. 0.20260711
Best mapping of FARBSTOFF_1 is WASSERSTOFF. 0.20782092
Best mapping of AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is HINDERNISREIHEN_LUECKEN. -1.141891E-5
tied with TEILCHEN.
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with AUSSERHALB_TONZYLINDER.
tied with INNERHALB_TONZYLINDER.
Best mapping of INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is HINDERNISREIHEN_LUECKEN. -1.141891E-5
tied with TEILCHEN.
tied with SIMULATIONSFELD.
tied with AUSSERHALB_TONZYLINDER.
tied with INNERHALB_TONZYLINDER.
Best mapping of DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is TONZYLINDER_MIT_ABLEITUNG_IN_WASSER. 0.3925444
Best mapping of GLAS_BECHER is GLAS_BECHER. 0.56850976
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_8 is GAS_DIFF_MODELL_6. 0.704475
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_7 is GAS_DIFF_MODELL_5. 0.70308757
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_4 is GAS_DIFF_MODELL_4. 0.6656184
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_3 is GAS_DIFF_MODELL_3. 0.68339753
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_2 is GAS_DIFF_MODELL_2. 0.7047111
Best mapping of FARB_DIFFUSION_15 is GAS_DIFFUSION_11. 0.7033694
Best mapping of FARB_DIFFUSION_14 is GAS_DIFFUSION_10. 0.70550513
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_1 is GAS_DIFF_MODELL_1. 0.71076137
Best mapping of FARB_DIFFUSION_13 is GAS_DIFFUSION_4. 0.0014617145
Best mapping of FARB_DIFFUSION_12 is GAS_DIFFUSION_7. 0.66200215
Best mapping of FARB_DIFFUSION_11 is GAS_DIFFUSION_9. 0.6836249
Best mapping of FARB_DIFFUSION_10 is GAS_DIFFUSION_8. 0.68277323
Best mapping of FARB_DIFFUSION_2 is OBJ_GAS_DIFFUSION_6. 0.20260711
Best mapping of FARB_DIFFUSION_1 is OBJ_GAS_DIFFUSION_5. 0.20782092
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_3 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_15. 0.50407606
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_2 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_7. 0.60059446
Best mapping of OBJ_FARB_DIFF_MODELL_1 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_8. 0.6014739
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_8 is OBJ_GAS_DIFFUSION_15. 0.611054
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_7 is GAS_DIFF_SIM_13. 4.1252213E-10
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_10.
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_6 is OBJ_GAS_DIFFUSION_6. 0.20260711
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_5 is OBJ_GAS_DIFFUSION_5. 0.20782092
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_4 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_13. -1.1904411E-5
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_11.
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_9.
tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_4.
tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_3.
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_3 is OBJ_GAS_DIFF_SIM_13. -1.1904411E-5
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_11.
tied with OBJ_GAS_DIFF_SIM_9.
tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_4.
tied with OBJ_GAS_DIFFUSION_3.
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_2 is OBJ_GAS_DIFFUSION_2. 0.3925444
Best mapping of OBJ_FARB_DIFFUSION_1 is OBJ_GAS_DIFFUSION_1. 0.35882026
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_6 is GAS_DIFF_SIM_9. 0.8146957
Best mapping of FARB_DIFF_MODELL_5 is GAS_DIFF_SIM_7. 0.81382596

Best mapping of OBJ_TEILCHEN is OBJ_TEILCHEN. 0.71076137
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_6 is GAS_DIFFUSION_4. 0.5883847
 Mapping with GAS_DIFFUSION_3 is also possible: 0.32881978
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_8 is GAS_DIFFUSION_6. 0.723341
 Mapping with GAS_DIFFUSION_5 is also possible: 0.22565836
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_3 is GAS_DIFFUSION_1. 0.92382544
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_4 is GAS_DIFFUSION_2. 0.9248385
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_5 is GAS_DIFFUSION_3. 0.58932257
 Mapping with GAS_DIFFUSION_4 is also possible: 0.30983046
 Best mapping of FARB_DIFFUSION_7 is GAS_DIFFUSION_5. 0.70747364
 Mapping with GAS_DIFFUSION_6 is also possible: 0.24196267
 Best mapping of OBJ_GLASBECHER is OBJ_GLASBECHER. 0.6415995
 Best mapping of OBJ_TEILCHEN_GITTER is OBJ_HINDERNISREIHE_MIT_LUECKEN. 0.6143739
 Mapping with OBJ_TEILCHEN_GITTER is also possible: 0.39019677
 Best mapping of OBJ_GROSSE_TEILCHEN is OBJ_GROSSE_TEILCHEN. 0.84084636
 Best mapping of OBJ_KLEINE_TEILCHEN is OBJ_KLEINE_TEILCHEN. 0.8460944
 Best mapping of OBJ_STOFF is OBJ_STOFF. 0.9048866
 Best mapping of OBJ_EXPERIMENT is OBJ_EXPERIMENT. 0.61403054
 Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_2 is OBJ_SAUERSTOFF. 0.6685575
 Mapping with OBJ_WASSERSTOFF is also possible: 0.4582974
 Best mapping of OBJ_FARBSTOFF_1 is OBJ_WASSERSTOFF. 0.6944661
 Mapping with OBJ_SAUERSTOFF is also possible: 0.20903867
 Best mapping of OBJ_AUSSERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_WASSER. 0.6620022
 Best mapping of OBJ_INNERHALB_DIALYSE_SCHLAUCH is OBJ_UNTER_GLASBECHER. 0.88626724
 Best mapping of OBJ_DIALYSE_SCHLAUCH_MIT_WASSER is OBJ_TONZYLINDER. 0.7311363
 Mapping with OBJ_TONZYLINDER_MIT_ABLEITUNG_IN_WASSER is also possible: 0.27717057
 Best mapping of OBJ_GLAS_BECHER is OBJ_AUSSERHALB_TONZYLINDER. -9.127717E-5
 tied with OBJ_INNERHALB_TONZYLINDER.

ECHO-Lauf zur Simulation des Problemlösens der Posttestaufgaben

Eingabedatei für den ECHO-Lauf

```
; datei: echo-diffusion-ballgeschichte-vor-simulation
; autor: Michael Rohr
; *****
;
; (defaults 'echo)
; *****
;
; (defun diffusion-ballgeschichte-vor-simulation ()
; (setq *problem* 'ballgeschichte-vor-simulation)
; (clear-net)
; *****
;
; Geschichte
; (proposition 'g2_1 "Ein Boot fährt auf den See hinaus.") ;
; (proposition 'g2_2 "Es ist früher Morgen.") ;
; (proposition 'g2_3 "Das Boot fährt zum Fischen.") ;
; (proposition 'g2_4 "Die Fischerin will grosse Fische fangen.") ;
; (proposition 'g2_5 "Grosse Fische sind zum Beispiel Karpfen und Rotaugen.") ;
; (proposition 'g2_6 "Sie legt ein Netz.") ;
; (proposition 'g2_7 "Das Netz hat Maschen.") ;
; (proposition 'g2_8 "Die Fische schwimmen in das Netz.") ;
; (proposition 'g2_9 "Die Maschen sind kleiner als die Karpfen.") ;
; (proposition 'g2_10 "Wenn die Karpfen in das Netz geraten, können sie deshalb mehr nicht durch
; die Maschen hindurch ins freie Wasser entkommen.") ;
; (proposition 'g2_11 "Die Karpfen bleiben gefangen.") ;
; (proposition 'g2_12 "In der Enge prallen sie gegeneinander.") ;
; (proposition 'g2_13 "Sie ändern dabei immer wieder ihre Schwimmrichtung.") ;
```

```
(proposition 'g2_14 "Aber es gibt auch noch kleine Fische im See.")
(proposition 'g2_15 "Kleine Fischen sind zum Beispiel Bitterlinge und Stichlinge.")
(proposition 'g2_16 "Diese kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_17 "Die Fischerin zieht das Netz langsam enger..")
(proposition 'g2_18 "Die kleinen Fische können durch die Maschen hindurch schwimmen.")
(proposition 'g2_19 "Die kleinen Fische entkommen in den See.")
(proposition 'g2_20 "Schliesslich zieht die Fischerin das Netz ein.")
(proposition 'g2_21 "Sie steuert das Boot wieder an Land.") ;
(proposition 'g2_22 "Gegen Mittag bringt die Fischerin ihren Fang zu den Fischhändlern.") ;
(proposition 'g2_23 "Sie verkauft die Karpfen.") ;
;*****
; Diffusionsexperiment
(proposition 'exp_diffusion_1 "In einem Glasgefäss befindet sich Wasser.") ;
(proposition 'exp_diffusion_2 "In einen Dialyseschlauch befindet sich eine Farbstofflösung mit der
Farbe lila.") ;
(proposition 'exp_diffusion_3 "Im Dialyseschlauch befindet sich eine weitere Farbstofflösung mit
der Farbe gelb.") ;
(proposition 'exp_diffusion_4 "Das Experiment wird gestartet.") ;
(proposition 'exp_diffusion_5 "Der Dialyseschlauch wird in das Gefäss mit dem Wasser gelegt.") ;
(proposition 'exp_diffusion_6 "Der lila Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch.");
(proposition 'exp_diffusion_7 "Der gelbe Farbstoff durchquert den Dialyseschlauch nicht.");
(proposition 'exp_diffusion_8 "Nach kurzer Zeit bilden sich im Wasser unterhalb des Dialyse-
schlauchs Schlieren.") ;
(proposition 'exp_diffusion_9 "Die Schlieren haben die Farbe lila.")
(proposition 'exp_diffusion_10 "Nach einer Weile erscheint der Dialyseschlauch gelb.") ;
(proposition 'exp_diffusion_11 "Nach einer Weile wird die lila Farbe im Wasser staerker.")
; Modellrelationen des Experiments (werden nach dem Arbeiten mit der Simulation analog zu dem
Experiment zur Simulation angenommen;
(proposition 'exp_diffusion_12 "Alle Stoffe werden als Teilchen dargestellt.")
(proposition 'exp_diffusion_13 "Der violette Farbstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'exp_diffusion_14 "Der gelbe Farbstoff ist ein Stoff.")
(proposition 'exp_diffusion_15 "Das Material des Dialyseschlauchs ist ein Stoff.")
(proposition 'exp_diffusion_16 "Der violette Farbstoff wird als aus Teilchen aufgebaut dargestellt.")
;
(proposition 'exp_diffusion_17 "Der gelbe Farbstoff wird als aus Teilchen aufgebaut dargestellt.") ;
(proposition 'exp_diffusion_18 "Der Dialyseschlauch wird als aus kleinsten Teilchen aufgebaut dar-
gestellt.") ;
; Modellrelationen der abhängigen Variable
(proposition 'exp_diffusion_19 "Die kleinen Wasserstoffteilchen dringen durch die Teilchendarstel-
lung des Dialyseschlauchs.")
(proposition 'exp_diffusion_20 "Die grossen Sauerstoffteilchen dringen nicht durch die Teilchendar-
stellung des Dialyseschlauchs.")
;*****
; Erfolgreiche Simulation
(proposition 'simulation_1 "Die Simulation findet auf einem Simulationsfeld statt.") ;
(proposition 'simulation_2 "Es werden kleine Kugeln als Modelle für Sauerstoff auf das Simulati-
onsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_3 "Es werden grosse Kugeln als Modelle für Wasserstoff auf das Simula-
tionsfeld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_4 "Es wird eine Reihe aus Hindernissen mit Luecken auf das Simulations-
feld gesetzt") ;
(proposition 'simulation_5 "Die Luecken zwischen den einzelnen Hindernissen sind grosser als die
kleinen Kugeln") ;
(proposition 'simulation_6 "Die Luecken zwischen den einzelnen Hindernissen sind kleiner als die
```

```

grossen Kugeln");
(proposition 'simulation_7 "Ich starte die Simulation.");
(proposition 'simulation_8 "Die Kugeln bewegen sich nach dem Start der Simulation.");
(proposition 'simulation_9 "Die Kugeln prallen ab und zu aufeinander.");
(proposition 'simulation_10 "Die Kugeln aendern dann ihre Bewegungsrichtung.");
(proposition 'simulation_11 "Die kleinen Kugeln passen zwischen den Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_12 "Die grossen Kugeln passen nicht zwischen den Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_13 "Die kleinen Kugeln fliegen durch die Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_14 "Die grossen Kugeln fliegen nicht durch die Luecken hindurch.");
(proposition 'simulation_15 "Ich beende die Simulation. ");
(proposition 'simulation_16 "Alle Stoffe werden als Teilchen dargestellt.");
(proposition 'simulation_17 "Wasserstoff ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_18 "Sauerstoff ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_19 "Das Material des Tonyzylinders ist ein Stoff.");
(proposition 'simulation_20 "Unter einem Glasgefass befindet sich ein Tonyzylinder mit einem
durchbohrten Gummistopfen.");
(proposition 'simulation_21 "Aus dem Gummistopfen f"uhrt ein Glasrohr in ein Wasserbad");
(proposition 'simulation_22 "Das Experiment wird gestartet.");
(proposition 'simulation_23 "Unter den Glaszylinder wird Wasserstoff geblasen.");
(proposition 'simulation_24 "Unter den Glaszylinder wird Sauerstoff geblasen.");
(proposition 'simulation_25 "Der Wasserstoff durchquert den Tonyzylinder.");
(proposition 'simulation_26 "Der Sauerstoff durchquert den Tonyzylinder nicht.");
(proposition 'simulation_27 "Wenn Wasserstoff durchgeleitet wird, sprudeln im Wasserbad Gas-
blasen.");
(proposition 'simulation_28 "Wenn Sauerstoff durchgeleitet wird, sprudeln im Wasserbad keine
Gasblasen.");
,*****
; 1. Zwei Erkl"arungen, warum grosse Fische zurueckgehalten werden und kleine durch das Netz
schwimmen.
(explain '(g2_6 g2_8 g2_16) 'g2_18)
(explain '(g2_6 g2_8 g2_9) 'g2_11)
,*****
; Erkl"arung des Simulationsexperiments (Wasserstoff-/Sauerstoffdiffusion) auf dem makroskopi-
schen Niveau:
; 1a. Modellbeziehung der unabh"angigen Variable: 3 beteiligte Stoffe
; Erkl"arungszusammenhaenge in der Simulation
; Modellbeziehung der Darstellung der 3 beteiligten Stoffe als Teilchen
(explain '(simulation_16 simulation_17) 'simulation_2)
(explain '(simulation_16 simulation_18) 'simulation_3)
(explain '(simulation_16 simulation_19) 'simulation_4)
; 1b. Modellbeziehung der abh"angigen Variablen: Durchdringen bzw. Nicht-Durchdringen der Gase
durch den Tonyzylinder
(explain '(simulation_11) 'simulation_25)
(explain '(simulation_12) 'simulation_26)
; 2. Makroskopische Erkl"arung: Zur"uckf"uhren der Diffusion (Nichtdiffusion) auf experimentellen
Aufbau
(explain '(simulation_20 simulation_21 simulation_22 simulation_23) 'simulation_25)
(explain '(simulation_20 simulation_21 simulation_22 simulation_24) 'simulation_26)
,*****
; Erkl"arungszusammenh"ange in der Simulation
; Erkl"arungskette, warum Wasserstoffteilchen in einer erfolgreichen Modellierung durch das Teil-
chengitter dringen und Sauerstoffteilchen nicht.
(explain '(simulation_7) 'simulation_8)
(explain '(simulation_5) 'simulation_11)

```

```

(explain '(simulation_6) 'simulation_12)
(explain '(simulation_11 simulation_8) 'simulation_13)
(explain '(simulation_12 simulation_8) 'simulation_14)
.*****
; Erklarungszusammenhaenge im Test-Experiment
; 1a. Modellbeziehung zur Darstellung der beteiligten Stoffe als Teilchen;
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_13) 'exp_diffusion_16)
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_14) 'exp_diffusion_17)
(explain '(exp_diffusion_12 exp_diffusion_15) 'exp_diffusion_18)
; 1b. Modellbeziehung zum Durchdringen des Dialyseschlauchs durch Wasserstoffs bzw. Nicht-
durchdringen des Sauerstoffs
(explain '(exp_diffusion_19) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_20) 'exp_diffusion_7)
; 2. Erklärung auf dem makroskopischen Niveau: Zurückführen der Diffusion (Nichtdiffusion) auf
experimentellen Aufbau
(explain '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_6)
(explain '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5) 'exp_diffusion_7)
.*****
; Analogien
; 1. Analogien zwischen Geschichte und Experiment
; Diese Analogien wurden durch den ersten ACME-Lauf zur Analogiebildung zwischen Experiment
und Geschichte bestimmt. (siehe dort)
(analogous '(g2_6 exp_diffusion_4) '(g2_18 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_6 exp_diffusion_4) '(g2_11 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g2_8 exp_diffusion_2) '(g2_18 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_8 exp_diffusion_3) '(g2_11 exp_diffusion_7) )
(analogous '(g2_16 exp_diffusion_2) '(g2_18 exp_diffusion_6) )
(analogous '(g2_9 exp_diffusion_3) '(g2_11 exp_diffusion_7) )
.*****
; Erklärungsanalogien zwischen Simulation (inkl. Simulationsexperiment) und Testaufgabenexpe-
riment
; Erklärungsanalogien zwischen dem bereits simulierten Experiment der Lernphase und Testaufgaben-
Experiment
; Auch hier wurden Erklarungsanalogien durch einen ACME-Lauf bestimmt.
; 1. Die Modellrelationen zwischen den beiden zugrundeliegenden Experimenten sind analog
; a) Das gilt für die beiden Farbstoffe und den Dialyseschlauch vs. die beiden Gase und den Ton-
zylinder
; 1. Zuerst die Teilchendarstellung von Wasserstoff im Experiment zur Simulation
; analog zur Teilchendarstellung des violettten Farbstoffs in der Testaufgabe
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_2 exp_diffusion_16) )
(analogous '(simulation_17 exp_diffusion_13) '(simulation_2 exp_diffusion_16) )
; 2. Entsprechende Analogie zwischen Sauerstoff und gelbem Farbstoff
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_3 exp_diffusion_17) )
(analogous '(simulation_18 exp_diffusion_14) '(simulation_3 exp_diffusion_17) )
; 3. Und auch für den Tonzylinder bzw. den Dialyseschlauch
(analogous '(simulation_16 exp_diffusion_12) '(simulation_4 exp_diffusion_18) )
(analogous '(simulation_19 exp_diffusion_15) '(simulation_4 exp_diffusion_18) )
; Es müssen auch für die beiden Erklärungsziele der abhängigen Variable Modellrelationen ange-
geben werden.
; Analogie für die Modelldarstellung des 1. Erklärungsziels, das Durchdringen von Wasserstoff vs.
violettem Farbstoff
(analogous '(simulation_11 exp_diffusion_19) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
; Erklärungsanalogie für die Modelldarstellung des 1. Erklärungsziels, das Durchdringen von Was-

```

```

serstoff vs. violettem Farbstoff
(analogous '(simulation_12 exp_diffusion_20) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
; Es gelten auch Erklärungsanalogien auf der makroskopischen Ebene der Experimente
(analogous '(simulation_22 exp_diffusion_4) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
(analogous '(simulation_22 exp_diffusion_4) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
(analogous '(simulation_23 exp_diffusion_2) '(simulation_25 exp_diffusion_6) )
(analogous '(simulation_24 exp_diffusion_3) '(simulation_26 exp_diffusion_7) )
,*****
; Keine klar formulierbaren Disanalogien!
,*****
(data '(exp_diffusion_1 exp_diffusion_2 exp_diffusion_3 exp_diffusion_4 exp_diffusion_5 exp_diffusion_6
exp_diffusion_7 exp_diffusion_8 exp_diffusion_9 exp_diffusion_10 exp_diffusion_11 simulation_2 si-
mulation_15 simulation_24 simulation_25 simulation_26 simulation_27 simulation_28 simulation_29
simulation_30 simulation_31 simulation_32 simulation_30))
(gross_on)
(run_exp)
(exit)

```

Ergebnis des ECHO-Laufs

```

Network has settled by cycle 81.
patched print_run
Test: TEST0 Total times: 82
NIL
Units not yet reached asymptote: 0
Explanatory coherence of system is: 2.490791
Total times: 82
EXP_DIFFUSION_1 has activation: 0.7780561
EXP_DIFFUSION_10 has activation: 0.6599989
EXP_DIFFUSION_11 has activation: 0.6599989
EXP_DIFFUSION_12 has activation: 0.8009547
EXP_DIFFUSION_13 has activation: 0.5606934
EXP_DIFFUSION_14 has activation: 0.5521504
EXP_DIFFUSION_15 has activation: 0.5521504
EXP_DIFFUSION_16 has activation: 0.6870401
EXP_DIFFUSION_17 has activation: 0.65761644
EXP_DIFFUSION_18 has activation: 0.65761644
EXP_DIFFUSION_19 has activation: 0.6051216
EXP_DIFFUSION_2 has activation: 0.8184396
EXP_DIFFUSION_20 has activation: 0.60514396
EXP_DIFFUSION_3 has activation: 0.8235265
EXP_DIFFUSION_4 has activation: 0.8601426
EXP_DIFFUSION_5 has activation: 0.7780561
EXP_DIFFUSION_6 has activation: 0.88290817
EXP_DIFFUSION_7 has activation: 0.88295496
EXP_DIFFUSION_8 has activation: 0.6599989
EXP_DIFFUSION_9 has activation: 0.6599989
G2_1 has activation: 1.4905112E-4
G2_10 has activation: 1.4905112E-4
G2_11 has activation: 0.76238203
G2_12 has activation: 1.4905112E-4
G2_13 has activation: 1.4905112E-4
G2_14 has activation: 1.4905112E-4
G2_15 has activation: 1.4905112E-4
G2_16 has activation: 0.604924

```

G2_17 has activation: 1.4905112E-4
G2_18 has activation: 0.7623611
G2_19 has activation: 1.4905112E-4
G2_2 has activation: 1.4905112E-4
G2_20 has activation: 1.4905112E-4
G2_21 has activation: 1.4905112E-4
G2_22 has activation: 1.4905112E-4
G2_23 has activation: 1.4905112E-4
G2_3 has activation: 1.4905112E-4
G2_4 has activation: 1.4905112E-4
G2_5 has activation: 1.4905112E-4
G2_6 has activation: 0.750244
G2_7 has activation: 1.4905112E-4
G2_8 has activation: 0.7457869
G2_9 has activation: 0.6056915
SIMULATION_1 has activation: 1.4905112E-4
SIMULATION_10 has activation: 1.4905112E-4
SIMULATION_11 has activation: 0.6919734
SIMULATION_12 has activation: 0.69206375
SIMULATION_13 has activation: 0.37715134
SIMULATION_14 has activation: 0.37717843
SIMULATION_15 has activation: 0.6599989
SIMULATION_16 has activation: 0.80283684
SIMULATION_17 has activation: 0.56919575
SIMULATION_18 has activation: 0.5523213
SIMULATION_19 has activation: 0.5523213
SIMULATION_2 has activation: 0.79431665
SIMULATION_20 has activation: 0.5824341
SIMULATION_21 has activation: 0.5824341
SIMULATION_22 has activation: 0.7466407
SIMULATION_23 has activation: 0.59518844
SIMULATION_24 has activation: 0.7706576
SIMULATION_25 has activation: 0.8478975
SIMULATION_26 has activation: 0.8487917
SIMULATION_27 has activation: 1.4905112E-4
SIMULATION_28 has activation: 0.6599989
SIMULATION_3 has activation: 0.6577127
SIMULATION_4 has activation: 0.6577127
SIMULATION_5 has activation: 0.40160292
SIMULATION_6 has activation: 0.40164953
SIMULATION_7 has activation: 0.3499149
SIMULATION_8 has activation: 0.5758474
SIMULATION_9 has activation: 1.4905112E-4