

Welchen Einfluss können Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung haben?

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

der Universität Paderborn

vorgelegt von Tobias Huhmann

Paderborn
2012

0	Einleitung.....	5
1	(Raum-)Vorstellung unter psychologischer und mathematikdidaktischer Perspektive – Fähigkeitskonzept vs. Denkprozess.....	8
1.1	Fähigkeitskonzepte zur Raumvorstellung.....	10
1.2	Denk- und Vorstellungsentwicklungen.....	13
1.2.1	Wahrnehmung	14
1.2.2	Vorstellung	18
1.2.3	Denk- und Vorstellungsentwicklung	21
2	Lernen mit dem Computer.....	41
2.1	Status quo: Computerunterstütztes Lernen.....	41
2.1.1	Befundlage in der empirischen Forschung	42
2.1.2	Befundlage in der Metaanalyse	46
2.1.3	Resümee	47
2.2	Die Cognitive Load Theory (CLT).....	47
2.3	Lernen mit Animationen	56
2.3.1	Animation als Repräsentationsform	56
2.3.2	Animationen und statische Bilder.....	57
2.3.3	Funktionen von Animationen	60
2.3.4	Probleme beim Einsatz von Animationen und Gestaltungsrichtlinien	63
3	Die empirische Untersuchung.....	74
3.1	Forschungsmethode.....	74
3.2	Untersuchungsdesign und Datenerhebung	78
3.3	Die Lernumgebung.....	80
3.3.1	Analyse der computerbasierten Aufgabenstellungen	81
3.3.2	Analyse der genutzten Programme.....	82
3.3.3	Erwartungen	89
3.4	Datenauswertung	92
4	Ergebnisse.....	97
4.1	Allgemeine Ergebnisse.....	97
4.1.1	Ausgangssituationen	97
4.1.2	Allgemeine Strategien bei der Aufgabenbearbeitung	98
4.1.3	Eigenverantwortlichkeit des Lerners	102
4.2	Spektrum von Verhaltensmustern – drei Prototypen	104
4.2.1	Fallbeispiel Michi	105
4.2.2	Fallbeispiel Johannes	119

4.2.3	Fallbeispiel Jan.....	126
4.3	Bedingungsfaktoren für und Umgang mit "Cognitive Load"	133
4.3.1	Sprache und Cognitive Load	133
4.3.2	Medien und Cognitive Load	137
4.4	Die Unterstützung durch Computeranimationen	151
4.4.1	Äußerlich-medial – von hilfreich über unnötig bis störend	151
4.4.2	Innerlich-mental – Bewegungsroutinen und Handlungsrouinen	155
4.4.3	Reduktion des Cognitive Load durch äußere und innere Unterstützung ...	158
4.5	Beobachten von Fremdhandlungen – Simultanes Handeln und Beobachten	159
4.5.1	Verkürzung der Handlung – Verkürzung der Bewegung	159
4.5.2	Kognitive Anforderungen beim "Konkreten und Mentalen Beobachten von Fremdhandlungen" und beim "Konkreten und Mentalen simultanen Handeln und Beobachten"	161
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	164
5	Konsequenzen und Ausblick.....	171
5.1	Entwicklung einer Lernumgebung zur Förderung des räumlichen Vorstellungsvermögens – Inter-Netzzo	171
5.2	"Operatives Beobachten"	172
5.2.1	Ein Plädoyer für gezielte unterrichtliche Phasen zur Entwicklung des "Operativen Beobachtens"	172
5.2.2	Ein Plädoyer für die erweiterte begriffliche Fassung des "Operativen Prinzips" in der Mathematikdidaktik unter explizitem Einbezug des "Operativen Beobachtens"	175
5.3	Erweiterter Vorstellungsbegriff – ein Vorschlag.....	178
6	Literaturverzeichnis.....	181
7	Abbildungsverzeichnis.....	204
8	Anhang	205
8.1	Interviewleitfaden.....	205
8.2	Kriterien zur Konstruktion der Tests	208
8.3	Informeller Vortest Würfelnetze	209
8.4	Informeller Nachtest Würfelnetze	213

Die Reise und das Unterwegs-Sein hört doch nie auf. So ist mein vorliegendes Reisetagebuch als Zwischenstation zu verstehen, nachdem ich dieses eine Land etwas näher erkundet habe. Sicher gibt es in diesem Land noch viel mehr zu entdecken und zu verstehen, und sicher wird mich auch das Ausland reizen, all die fernen Länder, die ich noch gar nicht bereist habe. – Aber ich höre ja nicht auf zu reisen ...

Und einem Weggefährten und feinem Freund möchte ich besonderen Dank sagen:

Andreas

0 Einleitung

„Mental imagery is remarkably able to substitute for actual perception ... having been incorporated into our perceptual machinery by eons of evolution in a three-dimensional world.“ – Roger N. Shepard

Der Begriff "Vorstellung" hat zu allen Zeiten die Menschheit bewegt. Die begriffsge-schichtliche Entwicklung zieht sich weit reichend durch viele Forschungsdisziplinen, insbesondere durch die Philosophie, Psychologie und Mathematik.

Sowohl Psychologen als auch Mathematikdidaktiker beschäftigen sich im Rahmen dieser Thematik mit der Beschreibung und der gezielten Förderung von Raumvor-stellung und ihrer Entwicklung.

Mit Blick auf den Mathematikunterricht wird in der Mathematikdidaktik ein Zusam-menhang der Raumvorstellung mit dem Einsatz "Neuer Medien" diskutiert: Die Bil-dungsoffensive "Schulen ans Netz" stellt zu Beginn der 2000-er Jahre die Didaktiker der Schulen und Hochschulen auch für den Mathematikunterricht an Grundschulen vor neue pädagogisch-(fach-)didaktische Herausforderungen.

"(Wie) lässt sich der Computer konzeptionell
und didaktisch sinnvoll in Unterrichtsprozesse einbinden?"

An diese übergeordnete (Leit-) Fragestellung schließen sich vielfältige potentielle Ar-beitsbereiche (insbesondere für den Mathematikunterricht der Grundschule) an:

- Forschungsergebnisse zum konzeptionell und didaktisch sinnvollen Einsatz sowie zum Einfluss und zur Wirksamkeit des Computereinsatzes sind nach wie vor nur punktuell vorhanden.
- Fachdidaktische Wirkungsforschung ist kaum vorhanden.
- Fragen zur Einbindung und zu den Einflüssen Neuer Medien in Lehr- Lernpro- zessen lassen sich bei Weitem noch nicht hinreichend beantworten.

Als einer der Vorreiter in der Mathematikdidaktik setzt sich Günter Krauthausen seit Ende der 80-er Jahre mit Fragen zum Computer- und Softwareeinsatz im Mathema-tikunterricht der Grundschule auseinander. Die Tatsache, dass er in seinem Haupt-vortrag auf der Bielefelder GDM-Tagung 2005 in seinem Resümee erneut auf seine

14 Jahre alte AWARE-Strategie als *Gebot der Stunde* verweist (vgl. auch Padberg 2005, Radatz et al. 1999, S. 28f) und dezidierte Arbeiten zur Wirkungsforschung bezüglich des Computereinsatzes einfordert, verdeutlicht den immer noch akuten Forschungsbedarf.

Vielmehr noch: In einer seiner jüngeren Veröffentlichungen weist Krauthausen (2008) mit

Nachdruck darauf hin, dass computerunterstütztes Mathematik-Lernen dem Primat der Didaktik zu gehorchen habe, und fordert die mathematikdidaktische Kommunität erneut auf, sich diesem Forschungsgebiet zu widmen:

A	Anforderungen definieren
W	Warten können
A	Argumente fordern
R	Ressentiments vermeiden
E	Euphorien verhindern

Abbildung 1: AWARE-Strategie
nach Krauthausen

„Gewiss, es gibt diverse Praxisberichte, aber immer noch findet man allzu unkritische Euphorie. Es gibt diverse Handbücher zum Computereinsatz in der Grundschule – meist von Pädagogen/ Psychologen, keines aus der Mathematikdidaktik (ganz anders als in der Sekundarstufe). Auffallend aber ist bei diesen grundschulbezogenen Werken, dass dort entweder Mathematik gar nicht vorkommt oder aber in höchst fragwürdiger Weise, d.h. recht weit entfernt vom fachdidaktischen Diskussionsstand. [...] Dass der Computer das Lernen tatsächlich befördert, ist bislang eher eine Hoffnung als eine tragfähige Tatsache. Eine Wirkungsforschung, die uns eine hinreichend verlässliche Effizienz bei gleichzeitig gesundem Verhältnis von Aufwand und Nutzen, also einen medienspezifischen Zusatznutzen des Computereinsatzes nachweisen würde, gibt es kaum. Und wie ist die Ernüchterung in den USA und Großbritannien einzuordnen, wo bereits die Computer wieder aus den Klassenzimmern geräumt werden? (Popp 2007)“ (Krauthausen 2008, S. 209).

Diese insgesamt unbefriedigende Forschungslage liefert die Ausgangssituation meiner Forschungen an der Schnittstelle zwischen Psychologie, Medien- und Mathematikdidaktik. Die vorliegende Arbeit geht der folgenden (Leit-) Frage nach: Welchen Einfluss können Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung in der Grundschule haben?

Im ersten Kapitel stelle ich relevante Forschungsergebnisse zu den Themen "Raumvorstellung" und "Vorstellung" im Grenzbereich zwischen Psychologie und Mathematikdidaktik dar.

Im zweiten Kapitel gehe ich auf die Forschungssituation hinsichtlich des computerunterstützten Lernens im Mathematikunterricht der Grundschule ein.

Der Begriffsapparat der "Mentalen Modelle" wird zur Beschreibung von Kognitionsentwicklungen im Kap 1.2.3 entfaltet. Die Cognitive-Load-Theorie (Kap. 2.2) liefert einen Rahmen zur Beschreibung von kognitiven Be- bzw. Überlastungen. Mit der "facilitating function" und der "enabling function" werden zwei unterschiedliche verständnisunterstützende Funktionen von Animationen hervorgehoben, die aus einer Reduktion des Cognitive Loads resultieren. Diese drei Perspektiven bilden meine Grundlage zur Analyse des Lernens mit Animationen.

Im dritten Kapitel entwerfe ich den methodischen Rahmen der empirischen Untersuchung. Anhand von problemzentrierten Intensiv-Leitfadeninterviews soll der von Grundschulern subjektiv empfundene Einfluss von Computeranimationen erhoben werden. Als Gesprächsgrundlage dienen Aufgabenstellungen zu (Würfel-) Netzen, die jeweils mittels Material (ausgeschnittene Netze und zusammensteckbare Plastikquadrate), am Computerbildschirm und durch aufgezeichnete Netze auf Papier dargeboten werden.

Im vierten Kapitel werden Ergebnisse der Analyse, Interpretation und Sortierung von Einzelfällen dargestellt. Dabei werden (überindividuelle) Verhaltensweisen herausgearbeitet und unter der Perspektive der Cognitive-Load-Theorie interpretiert. Vor diesem Hintergrund beschreibe ich den sich verändernden Einfluss von Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung über den gesamten Lernprozess. Als zentral zeichnen sich die unterschiedlichen kognitiven Anforderungen bei der "Beobachtung von Fremdhandlungen" im Vergleich zur "simultanen Durchführung und Beobachtung eigener Handlungen" ab.

Schließlich werden im letzten Kapitel Konsequenzen für die Analyse und Gestaltung mathematischer Lehr-Lernprozesse formuliert.

Zur einfacheren Lesbarkeit verwende ich das generische Maskulinum.

1 (Raum-)Vorstellung unter psychologischer und mathematik-didaktischer Perspektive – Fähigkeitskonzept vs. Denkprozess

Beschäftigt man sich aus psychologischer Sicht mit dem in der Oberkategorie "Vorstellungen" eingebetteten Begriff "Raumvorstellung", so findet man in der Literatur drei verschiedene Perspektiven:

1) Was ist Raumvorstellung?

Diese Frage steht synonym für die Interessen der jeweiligen Forschungsdisziplinen, die versuchen, das Konstrukt "Raumvorstellung" – im Sinne eines räumlichen Vorstellungsvermögens verstanden – über mentale Handlungsfähigkeiten beschreibend zu charakterisieren. (Fokus: Fähigkeitskonzepte)

2) Wie kommen die (Raum-)Vorstellungen, wie kommt das räumliche Vorstellen in den Kopf?

Geht es um die Entwicklung der Raumvorstellung beim Menschen, so ist die entwicklungspsychologische Auffassung zentral, Raumvorstellung als Entwicklung des räumlichen Denkens aus konkreten Handlungen zu betrachten. (Fokus: Denkprozesse)

3) Bilder im Kopf? – Existieren überhaupt Vorstellungen im Sinne innerer Bilder?

Wie werden Vorstellungen beim Menschen repräsentiert? (Fokus: Vokabular und Modelle zur Beschreibung interner Informationsrepräsentationen)

Darauf aufbauend stellt sich die Frage, welchen Einfluss diese psychologischen Denkweisen auf die Mathematikdidaktik haben. Und: (Wie) nutzt die Mathematikdidaktik im Angesicht ihrer fachlichen Bezüge die psychologischen Erkenntnisse?

Die Philosophie bezeichnet mit dem Begriff "Vorstellung" die Realisierung einer Verbindung vom Ich und der Welt – von Innen- und Außenwelt.

In der moderneren Entwicklungspsychologie (Piaget, Galperin, u. a.) werden (Raum-)Vorstellungen und (Raum-) Vorstellen im engen Zusammenhang mit gedanklichem Handeln als konstruktives Denken aufgefasst. Dabei beschäftigt sie sich mit den Fragen, wie, wann und wodurch sich Denken entwickelt.

Die Lernpsychologie, die Kognitive (und neuerdings die Neurokognitive) Psychologie untersuchen, wie Informationen gedanklich repräsentiert werden (vgl. Anderson & Bower 1973; Farah 1995; Kosslyn 1977, 1980, 1994, 1995; Kosslyn, Behrmann & Jeannerod 1995; Kosslyn & Moulton 2009; Paivio 1971; Pylyshyn 1973, 1981; Shepard 1982).

Auf der Anwenderseite übertragen die Pädagogische Psychologie und die Allgemeine Didaktik allgemeine Entwicklungs- und Lerntheorien auf (schulische) Lehr-Lern-Prozesse. Die Fachdidaktiken konkretisieren diese Denkweisen wiederum in Form von fachlichen Lehr-Lern-Prozessen.

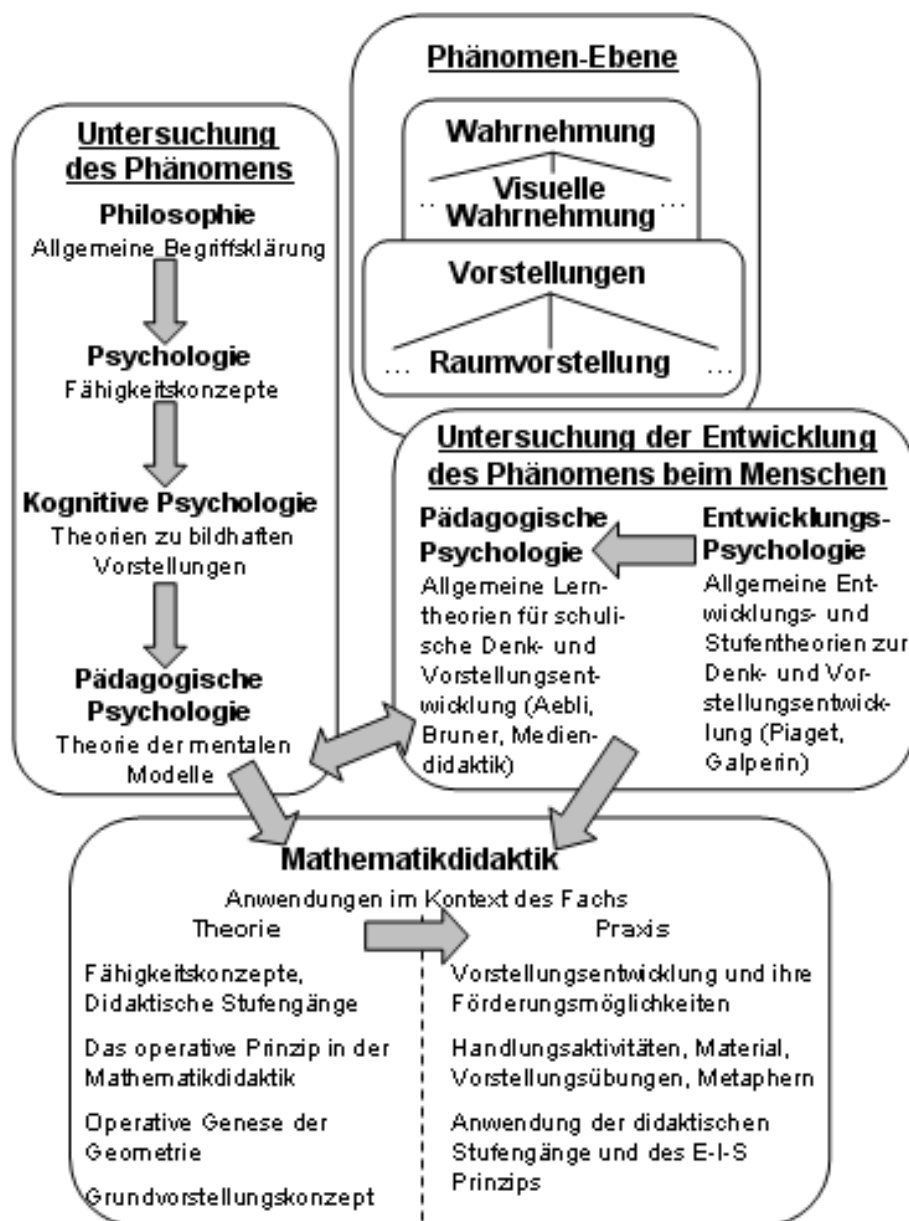


Abbildung 2: Überblick über das Zusammenwirken der beteiligten Disziplinen

In der aktuellen Mathematikdidaktik sind "Vorstellungen" ein bedeutsames Forschungsthema geworden. Dieses liegt nicht zuletzt in der Erkenntnis begründet, dass "innere Anschauung" für das Verstehen von Mathematik von zentraler Bedeutung ist:

„Erst wenn ein mathematisches Phänomen in seinen Bezügen kraft innerer Anschauung - das heißt Wahrnehmung von Vorstellungen - erlebt wird, kann es auch verstanden werden. **Verstehen ohne innere Anschauung ist unmöglich.** [...] Vorstellung, Begreifen und Begriff hängen über die innere Anschauung eng miteinander zusammen. **Mathematik entsteht durch innere Anschauung**“ (vgl. Weber 1998, S. 43).

Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, welchen Einfluss Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung haben können, oder allgemeiner, wie sich Vorstellungen unter der Verwendung von Animationen entwickeln können.

In einem ersten Schritt wird geklärt, was im Rahmen dieser Arbeit unter den Begriffen "Raumvorstellung", "Vorstellung" und "Vorstellen" verstanden werden soll. Wie eingangs benannt wurde, zeichnen sich verschiedene Perspektiven auf den Begriff "Raumvorstellung" ab. Einerseits wird das Konstrukt "Raumvorstellung" durch mentale Handlungsfähigkeiten charakterisiert, über welche ein Proband zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügt. Eine weitere Perspektive versucht "Raumvorstellungsentwicklungen" durch die Entwicklung von Denkprozessen zu beschreiben. Ausgehend von diesen grundsätzlich unterschiedlichen Sichtweisen werden im Folgenden philosophische, psychologische und mathematikdidaktische Ansätze zu einem Verständnis von Raumvorstellung zusammengeführt, welches auf mentale Modelle rekurriert. Anschließend wird das begriffliche Umfeld zu (Computer-) Animationen umrissen.

1.1 Fähigkeitskonzepte zur Raumvorstellung

„Anschaulich kann Raumvorstellung umschrieben werden als die Fähigkeit, in der Vorstellung räumlich zu sehen und räumlich zu denken. Sie geht über die sinnliche Wahrnehmung hinaus, indem die Sinneseindrücke nicht nur registriert, sondern auch gedanklich verarbeitet werden. So entstehen Vorstellungsbilder, die auch ohne das Vorhandensein der realen Objekte verfügbar sind. Dabei ist zu betonen, daß Raumvorstellung sich jedoch nicht darauf beschränkt, diese Bilder im Gedächtnis zu speichern und – in Form von Erinnerungsbildern – bei Bedarf abzurufen. Vielmehr kommt

die Fähigkeit, mit diesen Bildern aktiv umzugehen, sie mental umzuordnen und neue Bilder aus vorhandenen vorstellungsmäßig zu entwickeln, als wichtige Komponente mit hinzu“ (Maier 1999, S. 14).

Neben der Wahrnehmung als ein Vorstellungen konstruierender Akt betont Maier die Fähigkeit des Handelns mit mentalen Objekten. Seine Fassung von Raumvorstellung schließt dabei alle grundlegenden Bezugssysteme der Wahrnehmung mit ein und integriert sie als einen Teilbereich der Vorstellungen in eben dieses größere Ganze.

Maier (1999) konstatiert, dass faktorenanalytische Strukturkonzepte zur Intelligenz Raumvorstellung als separaten Faktor ausweisen (z.B. Spearman 1927, Thurstone 1938, Vernon 1971, Treumann & Roeder 1974, Guilford & Hoepfner 1976, Gardner 1991, 1998). Darauf aufbauend werden Strukturkonzepte zur Raumvorstellung entwickelt (z.B. El Koussy 1935, Thurstone 1949, 1950, Michael, Guilford et al. 1957, Linn & Petersen 1985, 1986):

„Während El Koussy (1935) Raumvorstellung noch als geschlossenen Faktor postuliert, sieht man heute komplexere multifaktorielle Intelligenzmodelle, insbesondere die Operationalisierung des räumlichen Vorstellungsvermögens in drei Faktoren, als tragfähig an. [...] Von epochaler Bedeutung ist die 3-Faktoren-Hypothese nach Thurstone (1949, 1950), deren Subfaktoren, in umfassender definitorischer Bedeutung, noch heute grundlegende Signifikanz besitzen. Das Kategoriensystem von Linn & Petersen (1985, 1986) stellt eine herausragende Ergänzung dar. Durch Zusammenfassung der beiden Kategoriensysteme manifestieren sich insgesamt die fünf wichtigsten Komponenten räumlich-visueller Qualifikationen:

- Räumliche Wahrnehmung
- Veranschaulichung oder Räumliche Visualisierung
- Vorstellungsfähigkeit von Rotationen
- Räumliche Beziehungen
- Räumliche Orientierung“ (Maier 1999, S. 50 f).

Maier fasst die Drei-Faktoren-Theorie von Thurstone und das Kategoriensystem von Linn & Petersen zu einem System aus diesen fünf räumlich-visuellen Qualifikationen tabellarisch zusammen (vgl. Abbildung 3).

Standort der Probanden	Dynamische Denkvorgänge Räumliche Relationen am Objekt veränderlich	Statische Denkvorgänge Räumliche Relationen am Objekt unveränderlich; Relationen der Person zum Objekt veränderlich
Person befindet sich außerhalb	Veranschaulichung	Räumliche Beziehungen
	Vorstellungsfähigkeit von Rotationen	Räumliche Wahrnehmung
Person befindet sich innerhalb	Räumliche Orientierung	Faktor K

Abbildung 3: Die Faktoren des räumlichen Vorstellungsvermögens, ihre Eigenschaften und wesentlichen Zusammenhänge nach Maier (1999)

Mit den groß hervorgehobenen Flächen verdeutlicht Maier Komponenten, die im privaten, beruflichen und schulischen Bereichen besonders umfassend in Erscheinung treten. Die mit kleineren Flächen veranschaulichten Komponenten stellen dabei relativ spezielle und spezifische Fähigkeiten dar. Als vertiefende Literatur der einzelnen Strukturkonzepte und ihrer Komponenten sei Maier (1999, S. 17-50) genannt.

Im Hinblick auf mein Forschungsvorhaben bleibt festzuhalten:

In der Psychologie und auch in der Mathematikdidaktik – hier verstanden als Anwendungswissenschaft der Psychologie – wird räumliches Vorstellungsvermögen über operationalisierte Subkategorien in Form mentaler Handlungsfähigkeiten charakterisiert. Darauf gründet auch der eingangs des Kapitels benutzte Begriff des Fähigkeitskonzeptes. Es werden Zustände bezogen auf diese Teilfähigkeiten bei Probanden beschrieben. Die Möglichkeit einer kontinuierlichen Feststellung der Entwicklung der Fähigkeiten bieten Fähigkeitskonzepte jedoch nicht.

Wie aber kommen die Vorstellungen in den Kopf? Die Psychologie beschreibt Stufentheorien (zur Intelligenzentwicklung), wenn es um die Entwicklung der Raumvorstellung beim Menschen geht. Dabei ist zentral, dass die Entwicklung der *Raumvorstellung* als Entwicklung des *räumlichen Denkens* verstanden wird und diese Auffassung wiederum eingebettet ist in Theorien zur allgemeinen Denk- und Vorstellungsentwicklung.

1.2 Denk- und Vorstellungsentwicklungen

Ilgner (1982) bettet Raumvorstellung in ein größeres Ganzes – in der Oberkategorie und den Kontext von Vorstellungen – ein.

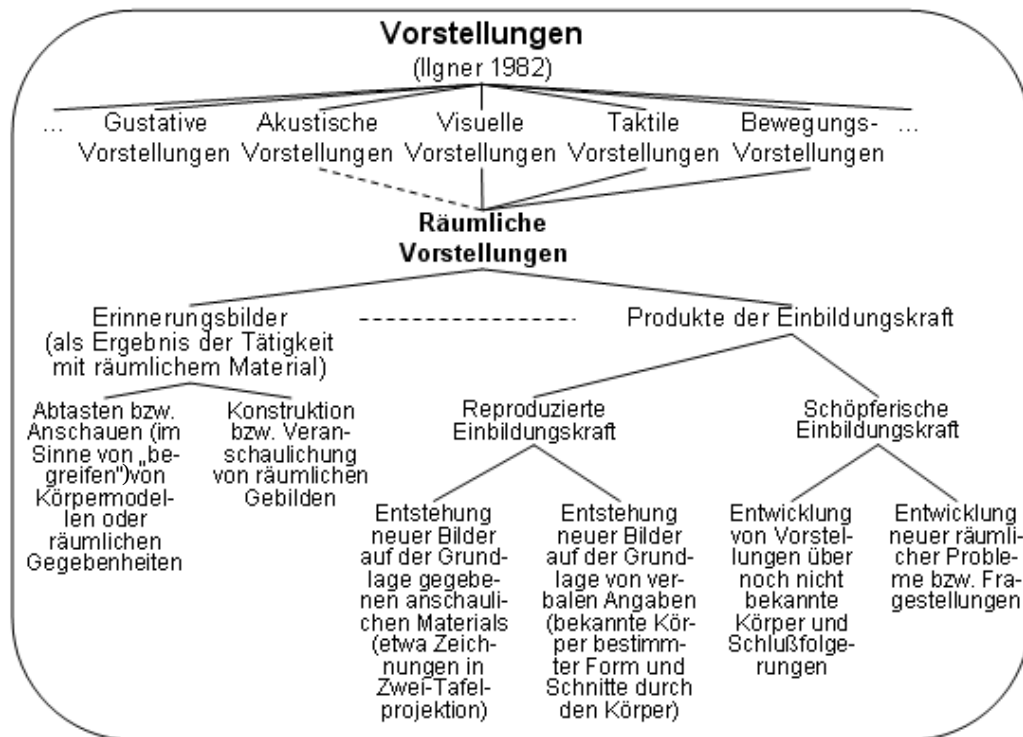


Abbildung 4: Einbettung der Raumvorstellung in den Kontext von Vorstellungen. Darstellung nach Ilgner (1982)

Raumvorstellung wird hier als ein Teilbereich der Vorstellungen aufgefasst, bei dem visuell und taktil inspirierte Vorstellungen sowie Bewegungsvorstellungen gebildet werden, wobei insbesondere letztere eine ausgezeichnete Rolle einnehmen. Von dieser einbettenden Auffassung geht auch die vorliegende Arbeit aus.

Vorstellungen werden im 20. Jahrhundert im Sinne kognitiver Leistungen (neben deduktivem Denken, Problemlösen oder Begriffsbilden) verstanden und als *Verinnerlichung* von gegenständlichen Handlungen zu gedanklichen Handlungen aufgefasst. Damit geht ein Wechsel von Repräsentationsebenen bezüglich des Objektes und der Handlung einher (Piaget, Galperin, Bruner, u.a.).

In diesem Kontext lässt sich Raumvorstellung als mentales Handeln mit mentalen Objekten basierend auf Verinnerlichungen von konkreten Handlungen durch Wahrnehmen charakterisieren.

1.2.1 Wahrnehmung

In der modernen Psychologie wird Wahrnehmung als aktiver Prozess verstanden, in dessen Verlauf Informationen gesucht, charakteristische Merkmale eines Gegenstandes identifiziert, diese Merkmale miteinander verglichen, passende Hypothesen gebildet und Vergleiche zwischen diesen Hypothesen und den empirisch gewonnenen Ausgangsdaten angestellt werden (vgl. Luria 1992, S. 230). An diesem offensichtlich komplexen Wahrnehmungsvorgang ist eine Vielzahl rezeptorischer Komponenten beteiligt, für die sich in der Kognitiven Psychologie der Begriff des sensorischen Gedächtnisses durchgesetzt hat (vgl. Maier 1999, S. 11).

Nach Solso & Reiss (2005, S. 70) ist das sensorische System die Schnittstelle, an der die innere Welt und die äußere Welt miteinander in Kontakt treten. „Aus der Umwelt kommende Informationen werden zuerst in den sensorischen Systemen aufgenommen, mit Hilfe von Aufmerksamkeitszuwendung werden sie dann in ein zwischengeschaltetes Kurzzeitgedächtnis überführt, dort memoriert und anschließend in einem andauernden Langzeitgedächtnis gespeichert. Als Schnittstelle zwischen Umwelt und Individuum spielt somit das sensorische Gedächtnissystem in unserem Leben eine wichtige Rolle (vgl. Yan 2002, S. 11).“

Das Hauptmerkmal des sensorischen Gedächtnissystems ist die Modalitätsspezifität: Basierend auf einer bestimmten sensorischen Modalität existieren verschiedene sensorische Register. „Je nachdem, welche Modalität beansprucht wird, gibt es ein visuelles, auditives, taktilen, gustatorisches und olfaktorisches sensorisches Gedächtnis (vgl. Yan 2002, S. 12).“ Neisser (1967) bezeichnet das auditive, visuelle und taktile sensorische Register als echoisches, ikonisches und haptisches Gedächtnis.

Nach Solso & Reiss (2005) wird jedes einzelne sensorische Ereignis im Kontext unseres Weltwissens verarbeitet. Unsere Vorerfahrungen geben einfachen sensorischen Erfahrungen eine Bedeutung. So bezieht sich Wahrnehmung auf eine Interpretation sensorischer Information – eine Interpretation der Dinge, die wir sensorisch aufnehmen. Der bedeutungsgebende Wahrnehmungsprozess ist daher „eng mit dem Gedächtnis und [den] darin gespeicherten Erfahrungen, Vorstellungen, mit dem Denken und auch mit der Sprache verbunden“ (vgl. Franke 2000, S. 38).

Insbesondere die haptische und die visuelle Wahrnehmung spielen als Einflussfaktoren auf das räumliche Vorstellungsvermögen eine bedeutsame Rolle.

Haptische Wahrnehmung:

Haptik entstammt dem griechischen Wort "haptesthai" und bedeutet soviel wie ergreifen, anfassen, berühren. Das haptische Wahrnehmungssystem besteht aus zwei Subsystemen, dem sensorischen und dem motorischen System. Das sensorische System beinhaltet diejenigen rezeptiven Einheiten, die für die konkrete Wahrnehmung der "Dingwelt" verantwortlich sind. Über dieses System werden Objekteigenschaften wahrgenommen und zentral verarbeitet. Das motorische System steuert die entsprechenden Bewegungen der Extremitäten.

Haptische Wahrnehmung bezeichnet somit diejenige Informationsaufnahme, die durch aktives Berühren und Ertasten von Objekt- und Raumeigenschaften ermöglicht wird (vgl. Grunwald & Beyer 2001, S. 10). Ähnlich, wie wir unsere Augen systematisch über eine Szene bewegen, setzen wir Handbewegungen zur Erfassung bestimmter haptischer Objektmerkmale systematisch ein. Lederman & Klatzky (1987, S. 342-368, und 1996, S. 431-446) beschreiben für einen derartigen Wahrnehmungsvorgang sogenannte Explorationsprozeduren. Darunter verstehen sie stereotype Muster von Handbewegungen, die ein Objekt hinsichtlich bestimmter Merkmale absuchen. Die Form eines Objektes wird beispielsweise exploriert, indem einzelne Kanten, Ecken, Flächen etc. Stück für Stück mit den Fingern abgetastet werden. Ob das haptische System inferiore Informationen bietet, die zur Erzeugung eines visuellen Bildes übersetzt werden und zur internen Objektrepräsentation führen ("Image-Mediation-Model"), oder ob es gleichermaßen reichhaltige Informationen ähnlich dem visuellen System liefert ("Direct Haptic Apprehension Model") hängt nach Lederman und Klatzky von der jeweiligen Wahrnehmungsanforderung ab.

Nach Mandler (1992) sind Vorstellungsbilder (Image-Schemata) Vorläufer der Konzeptbildung. In einem angeborenen aktiven Prozess der Wahrnehmungsanalyse werden sensomotorische Schemata in ein Zwischenformat transformiert, welches Bedeutungszuweisungen ermöglicht. „Perceptual analysis involves a redescription of spatial structure and of the structure of motion that is abstracted primarily from vision, touch, and one's own movement“ (ebd., S. 591).

Entgegen der Ansicht Piagets betrachtet Mandler Image-Schemata nicht als Kopie des perzeptiven Inputs, sondern misst ihnen bereits Bedeutung durch subjektive Wahrnehmungsanalyse und Interpretation zu.

Entwicklungspsychologisch betrachtet sind diese Image-Schemata das Repräsentationsformat für Wahrgenommenes: "Image schemata can be defined as dynamic analog representations of spatial relations and movements in space" (ebd., S. 591) (vgl. auch Grunwald & Beyer 2001, S. 116f).

Mandler versteht unter der Entwicklung von Image-Schemata die Entwicklung bildhaft-dynamischer Repräsentationen zu räumlichen Relationen und Bewegungen. Damit beschreibt er aus der Perspektive der Wahrnehmungspsychologie die Entwicklung räumlicher Vorstellungen basierend auf der haptischen Wahrnehmung.

Dass das haptische Wahrnehmungssystem zur Entwicklung räumlicher Vorstellungen als singuläres Wahrnehmungssystem bereits ausreichend sein kann, zeigen Studien bei blinden Menschen: Gardner (1991) weist bspw. erstaunlich visuelle Leistungen bei Blinden nach, die zeigen, „dass räumliche Dimensionen auch bei fehlenden visuellen Informationen erfahrbare und reproduzierbar sind. Raumrepräsentationssysteme sind sowohl visuellen als auch taktilen Erfahrungen zugänglich, und es muss keine privilegierte Beziehung zwischen visuellem Input und räumlicher Intelligenz bestehen“ (ebd., S. 174). Dementsprechend können blinde Menschen auch ohne visuelle Rückmeldung lernen, haptische Objekte systematisch zu erfassen.

Für sehende Individuen wird jedoch die visuelle Wahrnehmung vor der haptischen als zentrale Voraussetzung für räumliches Vorstellungsvermögen angenommen.

Visuelle Wahrnehmung

Frostig & Maslow (1978, S. 120) unterscheiden fünf Bereiche visueller Wahrnehmung (zu den folgenden Ausführungen vgl. auch Maier (1999) und Franke (2000; 2007)):

- Mit "Visuomotorische Koordination" wird die Fähigkeit des Menschen bezeichnet, das Sehen mit Bewegungen des eigenen Körpers oder Teilen des Körpers zu koordinieren. Beispiele: Fangen eines Balles, Essen mit Messer und Gabel, Falten eines Würfelnetzes. „Welche Anstrengungen gerade bei jüngeren Kindern mit dieser Koordination verbunden sind, zeigt sich bei Ausschneideübungen. Sie

„schneiden“ mit dem ganzen Körper, die Bewegung zeigt sich nicht nur an den Händen und Armen, sondern auch am Neigen des Oberkörpers und nicht selten geht auch die Zunge mit.“ (vgl. Franke 2007, S. 38)

- "Figur-Grund-Diskrimination" kennzeichnet die Fähigkeit, in einem komplexen Hintergrund bzw. in einer Gesamtfigur eingebettete Teilfiguren zu erkennen und zu isolieren. Beispiele: "Wimmelbilder", "Tangram"
- Mit "Wahrnehmungskonstanz" wird die Fähigkeit bezeichnet, Figuren in verschiedenen Größen, Anordnungen, räumlichen Lagen oder Färbungen wieder zu erkennen und von anderen Figuren zu unterscheiden. Beispiele: Erkennen eines Würfels in verschiedenen Lagen, Größen, etc., "Sortierübungen" von Gegenständen nach vorgegebenen Merkmalen unter Vernachlässigung weiterer Merkmale (z.B. ihrer Form, unabhängig von der Größe, etc.)
- Mit "Wahrnehmung räumlicher Beziehungen" wird die Fähigkeit benannt, Beziehungen zwischen räumlich vorgegebenen Objekten zu erkennen und zu beschreiben. Beispiele: Erkennen und Beschreiben von Kongruenzen, Überlappungen, Berührungen von Figuren in unterschiedlichen Lagen
- Die "Wahrnehmung der Raumlage" steht in engem Zusammenhang zum letztgenannten Punkt und wird als das Erkennen der Raum-Lage-Beziehung eines Gegenstandes bezüglich des Standpunktes eines Beobachters erklärt. Beispiele: Der "Drei-Berge-Versuch" von Piaget, Aufgabenstellungen zu "Schauen und Bauen" (vgl. Müller, Röhr & Wittmann (1997))

Hoffer (1977) stellt zwei weitere Fähigkeiten heraus:

- Mit "Visuelle Unterscheidung" beschreibt er die Fähigkeit, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Objekten zu erkennen. Beispiel: Sortieren und Klassifizieren geometrischer Objekte
- "Visuelles Gedächtnis" bezeichnet nach ihm die Fähigkeit, charakteristische Merkmale eines nicht mehr präsenten Objektes in der Vorstellung auf andere präsente Objekte zu beziehen. Beispiel: Vergleich von Eigenschaften des Würfels mit einem beliebigen Quader unter Verwendung entsprechender Vorstellungen

1.2.2 Vorstellung

Aspekte zur begriffsgeschichtlichen Entwicklung des Vorstellungsbegriffs finden sich in der Philosophie, der Psychologie und der Mathematikdidaktik. Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über den Begriff "Vorstellung" in den Bezugsdisziplinen Philosophie und Psychologie gegeben.

Die geschichtliche Entwicklung des Begriffs Vorstellung lässt sich nach Solso, MacLin & MacLin (2004, S. 291) in drei Zeitalter klassifizieren: „the philosophic [...] period, the measurement period, and the cognitive and neurokognitive period“.

In Kürze: "Vorstellung" in der Philosophie

Dieser kurze Exkurs in die Philosophie erhebt in keiner Weise den Anspruch einer vertieft philosophischen Auseinandersetzung mit dem Thema "Vorstellungen". Es sollen lediglich Strömungen der Philosophie aufgezeigt werden, da sich Parallelen zu unterschiedlichen Denkweisen in der (Kognitiven) Psychologie beobachten lassen.

Der Ursprung des Begriffs "Vorstellung" ist der Philosophie zuzuschreiben, die mit ihm die Realisierung der Verbindung des Ichs mit der Welt bezeichnet – die Realisierung einer Verbindung von Innen- und Außenwelt. Schopenhauer versteht die Welt als "Wille und Vorstellung". Seiner Auffassung nach existiert keine von der Wahrnehmung unabhängige Außenwelt – die Wahrnehmungen lassen in uns die Außenwelt als Vorstellung *erscheinen*. „Die Welt ist meine Vorstellung“ – was uns dabei als Welt erscheint, ist nur für uns, nicht an sich. Diese in uns erscheinende Welt ist die individualisierte und verknüpfte Erscheinung des eigenen Willens. Der Vorstellungswelt liegt demnach der Wille zugrunde, den Schopenhauer wiederum als grund- und ziellosen Drang versteht.

Die geschichtliche Entwicklung des Begriffsverständnisses in der Philosophie ist durch ein breites Spektrum an Erklärungsversuchen gekennzeichnet (vgl. Eisler 1904, S.661-670): Als ...

- "Ein-Bilden" des Äußeren zum Innern (nach Aristoteles, Heinroth),
- "Nachbildungen von Wahrnehmungen" (nach Hume),
- "erinnerte Anschauung" (nach Hegel, WW. VII 2, 323. vgl. XI, 63),

- "Wiedererinnerung an Ideen", welche die Seele vor ihrem Eintritt in den Körper an einem "überhimmlischen" Ort geschaut hat (Platon)
- "bewußte Empfindung" (Spicker, Kant, Hume und Berkeley, S. 134)
- "Wiederholung [Reproduktion] einer Empfindung, eines Gefühls oder einer sinnlichen Wahrnehmung" (Czolbe, Gr. u. Urspr. d. menschl. Erk. S. 225 ff),
- "tendenziell ergänzungsbedürftig" (Hartley),
- "teils aus den Sinnen, teils aus der Reflexion entsprungen" (nach Bonnet),
- "Begriff und Anschauung" (Kant). Nach ihm existiert die bewusste Vorstellung. Auf ein Subjekt bezogen sei sie Empfindung, auf ein Objekt bezogen sei sie Erkenntnis.

Das Begriffsverständnis bewegt sich in seiner geschichtlichen Entwicklung in der Philosophie zwischen den Polen Wahrnehmung und Erkenntnis. Zwischen den "konkret-emotionalen" Polen eines jeden Wahrnehmens eines beliebigen Inhalts und den "abstrakt-rationalen" Polen der Erkenntnis des Begriffs liegen Ausgestaltungen der erinnerten Wahrnehmung in Gestalt von Erinnerungsbildern.

In Kürze: "Vorstellung" in der Psychologie

Die Kognitive beziehungsweise Neurokognitive Psychologie fokussiert die Frage, wie die gedankliche Repräsentation von Informationen beschrieben werden kann. Zur Antwort liefert sie drei Theorien:

1. Die "Dual-Coding-Hypothese" (Bilder und Begriffe) (vgl. Paivio)
2. Die "konzeptuell-propositionale Hypothese" (abstrakt begrifflich) (vgl. Anderson & Bower und Pylyshyn)
3. Die "Hypothese von der funktionalen Äquivalenz": Vorstellen und Wahrnehmen sind einander sehr ähnlich, daher liegt die Beschreibung bildhafter Vorstellungen nahe (vgl. Shepard und Kosslyn)

Diese zum Teil sehr gegensätzlichen Positionen (insbesondere die 2. und 3.) werden in der seit den 1970-er Jahren andauernden "Mental Imagery"-Debatte durch ihre Hauptvertreter Kosslyn und Pylyshyn mit immer wieder neuen Forschungsergebnissen weiter verfolgt und fundiert.

Eine meines Erachtens relativierende, gleichzeitig verbindende Sichtweise auf die obige Fragestellung liefert die Theorie der "Mentalen Modelle", da sie sowohl bildliche als auch propositionale interne Repräsentationen beschreibt, welche in unterstützender Wechselwirkung miteinander gesehen werden. Am Ende des Kapitels 1.2.3 werden diese zugrunde liegenden kognitionspsychologischen Perspektiven beschrieben.

Der Begriff "Denk- und Vorstellungsentwicklung" wird in der vorliegenden Arbeit bewusst gewählt:

Der Begriff "Vorstellung" war lange Zeit in der Psychologie verpönt, und es wurde nur von Denk- bzw. Intelligenzentwicklung gesprochen: „Das behavioristische Manifest [...] brandmarkte die Introspektion, die ein entscheidender Bestandteil der [...] Tests zur bildhaften Vorstellung war, als unwissenschaftliche Methode. [...] Die neue Wissenschaft vom Verhalten war der objektiven Beobachtung offener Reaktionen verpflichtet, und Begriffe wie Bewusstsein, seelische Zustände, Seele und Vorstellung sollten nicht verwendet werden. Die Ablehnung der bildhaften Vorstellung und der subjektiven Introspektion mentaler Bilder als Themen, die es wert waren, erforscht zu werden, verleitete viele Psychologinnen und Psychologen dazu, sich von der bildhaften Vorstellung abzuwenden [...]“ (Solso & Reiss 2005, S. 269).

Studiert man mit diesem Fokus die Inhaltsverzeichnisse psychologischer Publikationen, so lässt sich bis heute eine Vermeidung des Begriffs "Vorstellung" beobachten.

Demgegenüber sehe ich einen wesentlichen Vorzug des Begriffs "Vorstellungen" in der kognitionspsychologischen Erkenntnis, dass mentale Repräsentationen sowohl analog-bildhaft, als auch propositional vorliegen können (s. auch Kapitel 1.2.3). Mit der Begriffskomponente "Denkentwicklung" soll der abstraktere Charakter mentaler Repräsentationen, also die Entwicklung propositionaler Repräsentationen durch hypothesengeleitete Beobachtung, Analyse und Reflexion betont werden, mit der Komponente "Vorstellungsentwicklung" die Entwicklung analog-bildhafter Repräsentationen. Für diese Begriffswahl sprechen auch Forschungsergebnisse, die mit dem "Aufeinander-Angewiesen-Sein" beider Repräsentationsarten insbesondere diesen Wechselwirkungscharakter hervorheben (vgl. Kintsch 1998).

1.2.3 Denk- und Vorstellungsentwicklung

... aus entwicklungspsychologischer Perspektive

Zunächst stelle ich Galperins Theorie der "etappenweisen Ausbildung geistiger Operationen" sowie Piagets Erkenntnisse zur Entwicklung des räumlichen Denkens vor dem Hintergrund seiner Stufentheorie zur Intelligenzentwicklung dar. Diese beiden allgemeinen Theorien zur Denk- und Vorstellungsentwicklung bilden neben Aebli's didaktischer Deutung und Weiterentwicklung der piagetschen Erkenntnisse zu dem allgemeindidaktischen "Operativen Prinzip" das Fundament der Wittmannschen Interpretation des "Operativen Prinzips" für die Mathematikdidaktik (s. Abbildung 5):

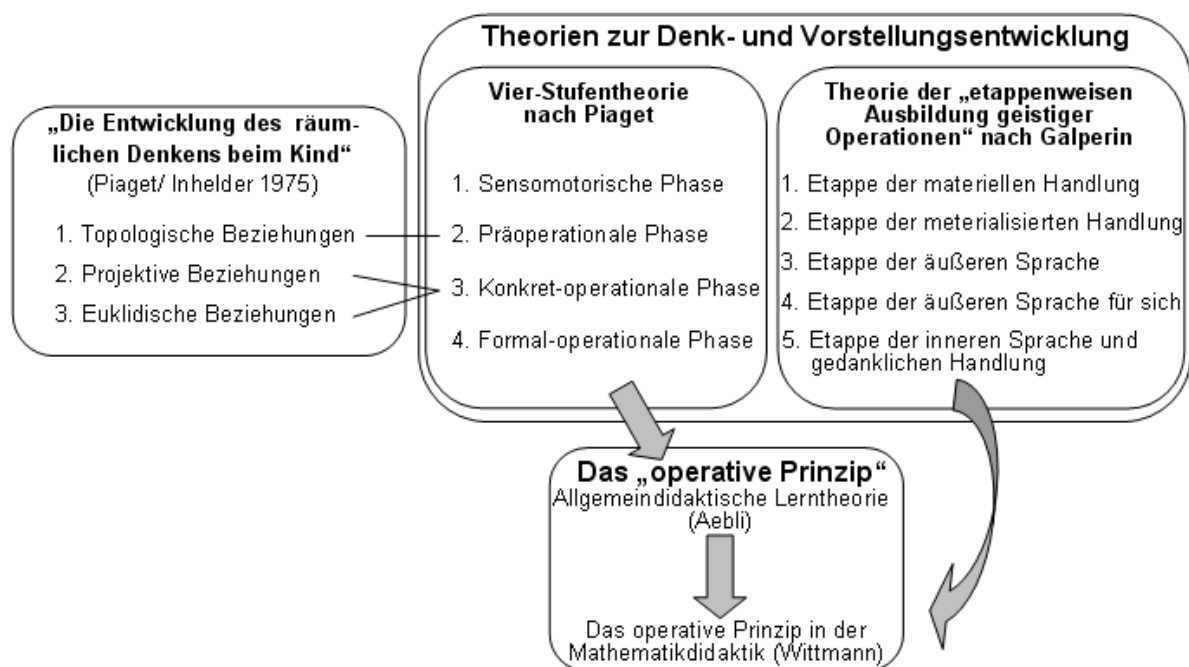


Abbildung 5: Überblick über die Zusammenhänge entwicklungspsychologischer und allgemeindidaktischer Grundlagen des operativen Prinzips in der Mathematikdidaktik.

(i) Denk- und Vorstellungsentwicklung bei Galperin: „Handeln – Sprechen – Denken“

Galperins Forschungsinteresse gilt den psychischen Tätigkeiten, ihrer Entwicklung und ihren konkreten Inhalten (vgl. Galperin 1969, S. 396). Bezogen auf die Bildung geistiger Operationen muss seiner Auffassung nach „die Grundstruktur des gesellschaftlichen Lebens auch die Grundstruktur der menschlichen Psyche bestimmen“ (Galperin 1969, S. 367). Mit seiner Lerntheorie der „etappenweisen Ausbildung geistiger Operationen“ beschreibt er, „wie ausgehend von konkreten Handlungen über

deren sprachliche Beschreibung und Erfassung kognitive Fähigkeiten erlernt werden“ (Weber 2007, S. 95).

„Nur die reale Tätigkeit des Kindes, die immer sinnvolle Tätigkeit ist, [bestimmt] sowohl seine psychische Gesamtentwicklung als auch den Verlauf der einzelnen psychischen Prozesse“ (Galperin 1969, S. 369). Die Entwicklung kognitiver Fähigkeiten, die seiner Auffassung nach von außen stimuliert und gesteuert werden kann, verläuft in einem Prozess der Verinnerlichung realer Handlungen, bei der „die psychische Tätigkeit das Ergebnis der Übertragung des äußeren materiellen Handelns [...] in die Form der Wahrnehmungen, der Vorstellungen und Begriffe [darstellt]“ (ebd., S. 374; vgl. auch Weber 2007, S. 95).

Mit seiner Theorie der „etappenweisen Ausbildung geistiger Operationen“ stellt Galperin insgesamt fünf Etappen einer auf den Aneignungsvorgang gerichteten Lerntheorie dar, welche „die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen [versteht] (Galperin 1974)“:

- „1. Etappe der „materiellen Handlung“: Konkrete Handlungen mit und an gegenständlichen Dingen. [Galperin 1969, S. 375; Galperin 1974, S. 36 f]
2. Etappe der „materialisierten Handlung“: Handlung mit und an Darstellungen (Diagrammen, Skizzen, Texten und Modellen), die – im Sinne einer Isomorphie – wesentliche Eigenschaften der repräsentierten Gegenstände enthalten. [Galperin 1969, S. 378 ff; Galperin 1974, S. 37 f]
3. Etappe der „äußeren Sprache“: Loslösen von den Gegebenheiten eines Gegenstandes oder der Darstellung durch sprachliches Beschreiben seiner Merkmale, wodurch die ganze Handlung in laut gesprochene Sprache übertragen wird. Dadurch wird das Lernen in seinem Handlungsablauf verfolgt- und kontrollierbar. [Galperin 1969, S. 382 f; Galperin 1974, S. 40]
4. Etappe der „äußeren Sprache für sich“: Gedankliche „entlautete“ Beschreibung eines Sachverhalts in Form eines Selbstgesprächs, wodurch er gedanklich bearbeitet – und [überhaupt] bearbeitbar – wird. [Galperin 1969, S. 384 f; Galperin 1974, S. 40]
5. Etappe der „inneren Sprache und gedanklichen Handlung“: Kognitive Prozesse treten ohne Verbindung zu einem Sachverhalt auf, im Stil von „wenn dieses so gemacht würde, dann würde sich das ergeben“. Hier wird nur noch das

Endergebnis sprachlich formuliert, nicht mehr der Handlungsprozess der Ergebniserzielung [Galperin 1969, S. 384 f, Galperin 1974, S. 40]“ (Weber 2007, S. 95 f).

Nach Galperin (1969) werden diese aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen vom Lernenden nacheinander durchlaufen und bilden damit ein hierarchisches System der Abstraktion.

Die gegenständlichen Handlungen des Schülers stellen in diesem Konzept „das dominierende und entscheidende Glied des Aneignungsprozesses [kognitiver Fähigkeiten] dar“ (Galperin, Saporoshez & Elkonin 1974, S. 81). Darauf basierend liefert die Übertragung in gesprochene Sprache zusammen mit der Loslösung von den gegenständlichen Handlungen einen Ausdruck der gedanklichen Abstraktion. Sprache wird dadurch zum stellvertretenden Kommunikationsmittel für die gegenständlichen Handlungen und zunehmend „zum Mittel des Bewusstseins und gedanklichen Handelns“ (Weber 2007, S. 97).

In der letzten Etappe verlaufe die innere Sprache „automatisch und außerhalb der Grenzen der Selbstbeobachtung“ (Galperin 1969, S. 389), wodurch sie der Introspektion nicht mehr zugänglich sei.

Bei Galperin bildet die Sprache „das Grundsystem der Hilfsmittel der psychischen Tätigkeit“ (Galperin 1969, S. 368). Sie dient nicht nur der „Illustration des Materiellen, sondern sie ermöglicht das Handeln auf einer höheren Stufe“ (Weber 2007, S. 97). So lässt sich Galperins Lerntheorie durch die Trias „Handeln – Sprechen – Denken“ zusammenfassen.

(ii) Denk- und Vorstellungsentwicklung bei Piaget: „Handeln – Denken – Sprechen“

„Jean Piagets Forschungsinteresse gilt der Entwicklung kognitiver Fähigkeiten im Kindes- und Jugendalter. Er geht davon aus, dass sich Individuen kognitiv entwickeln, indem sie handeln und sich aktiv mit der Umwelt auseinandersetzen. Dabei erzielen sie Erfolge und Misserfolge, die sie mit ihrem bestehenden Wissen in Wechselwirkung bringen. Für Piaget bildet nicht die Wahrnehmung oder Sprache, sondern die ‚Handlungsaktivität die Quelle und Basis der Wissens- und Intelligenzentwicklung‘

[Reusser 1998, S. 119]. Dabei ist die Fähigkeit des Erkennens nicht per se vorhanden, sondern sie entwickelt sich“ (Weber 2007, S. 90).

Nach Piaget & Inhelder (1975) durchläuft ein Kind während seiner kognitiven Entwicklung mehrere aufeinander aufbauende Stufen zur Entwicklung des räumlichen Denkens. Diese lassen sich durch verschiedene Geometrien als drei Grundformen räumlicher Beziehungen charakterisieren:

1. Die Entwicklungsstufe der topologischen Beziehungen,
2. Die Entwicklungsstufe der projektiven Beziehungen,
3. Die Entwicklungsstufe der euklidischen Beziehungen.

Beim Durchlaufen dieser Stufen werden die räumlichen Beziehungen Schritt für Schritt aufgebaut: „Das Kind empfängt sie nicht passiv nur aufgrund von Wahrnehmung, sondern es konstruiert die Beziehungen ausgehend vom konkreten Handeln mit räumlichen Gegenständen. Der Wahrnehmung folgt ein Prozess der inneren Nachahmung, also des Handelns mit Vorstellungsbildern. Somit erfolgt die Abstraktion vom einfachen sensorischen Tun des Kindes zum inneren systematischen Operieren mit geometrischen Objekten auf einer höheren Stufe“ (Franke 2007, S. 77).

Hierbei unterscheiden Piaget & Inhelder grundlegend zwischen dem wahrgenommenen und dem vorgestellten Raum (Raumwahrnehmung – Raumvorstellung): „[Der wahrgenommene Raum] erreicht sogar schon eine projektive und beinahe metrische Stufe, wenn die bildliche Vorstellung gerade erst beginnt und bei der Konstruktion – teilweise auch bei der Rekonstruktion – der elementaren topologischen Relationen verweilt. Zwischen der Wahrnehmungs- und Vorstellungskonstruktion besteht also trotz der Analogie ihrer Entwicklungsprozesse ein Abstand von mehreren Jahren“ (Piaget & Inhelder 1975, S. 523).

In Anlehnung an zur Oeveste (1987, S. 43) lässt sich Piagets Theorie zur Entwicklung des räumlichen Denkens integriert in die Piagetsche Vier-Stufentheorie der Intelligenzentwicklung auffassen (s. Abbildung 6):

„Entwicklung des räumlichen Denkens“ (in Anlehnung an Maier 1999, S. 90ff, und zur Oeveste 1987, S. 43)	Vier - Stadientheorie der Intelligenzentwicklung (in Anlehnung an Zimbardo u.a. 2004)
	1. sensomotorische Phase (bis zum Alter von zwei Jahren): „Die wichtigste kognitive Funktion, die während dieser Zeit erworben wird, ist die Fähigkeit, mentale Repräsentationen von nicht vorhandenen Objekten – mit denen das Kind nicht in direktem sensomotorischem Kontakt steht – auszubilden.“
Die Entwicklungsstufe der topologischen Beziehungen Kategoriale Relationen Erkennen und Unterscheiden von Merkmalen wie .. nah/fern offen/geschlossen innen/außen usw.	2. präoperationale Phase (zwei bis sieben Jahre): „Der große kognitive Fortschritt auf dieser Entwicklungsstufe ist die verbesserte Fähigkeit zur mentalen Repräsentation von physikalisch nicht vorhandenen Objekten.“
Ab 7 Jahren: Die Entwicklungsstufe der projektiven Beziehungen Ordnungsrelationen A kommt vor B Z liegt rechts von K usw. Relativität der Standpunkte und das In-Beziehung-Setzen von Perspektiven Die Entwicklungsstufe der euklidischen Beziehungen Distanzrelationen <u>Qualitative Operationen:</u> Konstruktion von Linien, Figuren, Körpern. Erfassen von Invarianz und Kongruenz <u>Einfache Metrik:</u> Längenmessung, konstante Maßeinheit, konstantes Bezugssystem <u>Flächen- und Volumenberechnung:</u> Multiplikation als Koordinierungsinstrument	Ab 7 Jahren: 3. konkret-operationale Phase (sieben bis elf Jahre): „In diesem Stadium ist das Kind schon zu mentalen Operationen in der Lage, das sind Handlungen, die im Geist ausgeführt werden und zur Entwicklung des logischen Denkens führen.“
	4. formal-operative Phase (ab elf Jahre): „In diesem letzten Stadium der kognitiven Entwicklung wird das Denken abstrakt. Adoleszenten sind in der Lage zu erkennen, dass ihre Realität nur eine von mehreren vorstellbaren ist [...]“ (ebd., S. 453 ff)

Abbildung 6: Integrierte Darstellung von Piagets Theorien zur Entwicklung des räumlichen Denkens und der Vier-Stadientheorie der Intelligenzentwicklung

Insgesamt zeigen diese Entwicklungsstadien, dass Menschen im Verlaufe ihrer kognitiven Entwicklung mehr und mehr lernen, mit mentalen Objekten zu handeln.

Nach Piaget & Inhelder bildet dabei nicht das Sehen, sondern die Handlung das zentrale Fundament für die Denk- und Vorstellungsentwicklung: „Rein visuelle Bilder, deren Konstruktion nur durch solche Bewegungen bedingt ist, die der ausschließlich auf das Sehen [...] bezogenen sensomotorischen Aktivität innewohnen, [...] bilden – wenn sie in dieser Reinform überhaupt existieren – nicht das Wesentliche der Raumanschauung. [...] Kurz gesagt, die Motorik, die schon bei der Wahrnehmungsaktivität mitwirkt und daher schon bei der Wahrnehmung in die Konstruktion des Raumes eingreift, erscheint von neuem als wesentliche Komponente beim Erarbeiten des vorgestellten Bildes und folglich auch der anschaulichen Raumvorstellungen“ (Piaget & Inhelder 1975, S. 66 f). [...] „Die Vorstellung ersetzt also erst dann wirklich das Handeln, wenn es von diesem Handeln selbst ausreichende Informationen empfangen hat, und man kann sie demnach nicht ohne einen künstlichen Schnitt von ihrem Handlungskontext lösen, ebenso wie man eine Wahrnehmung nicht von ihrem sensomotorischen Kontext trennen kann“ (Piaget & Inhelder 1975, S. 525 f).

In diesem Zusammenhang bringt Besuden (1980, S. 107) mit seiner Auffassung – „Operatives Denken ist in der Geometrie von räumlichem Denken kaum noch zu unterscheiden“ – die Integration des Begriffs "Raumvorstellung" in Theorien zur Denk- und Vorstellungsentwicklung auf den Punkt.

Kognitive Strukturen werden nach Piaget in der handelnden Auseinandersetzung mit Problemen entwickelt – natürlich nicht nur durch bloßes Handeln, sondern insbesondere durch die "Verinnerlichung" von Handlungen. „Denken, das heißt ‚mentale Operationen‘“, sind eben „Handlungen, die im Geist ausgeführt werden“ (vgl. Weber 2007, S. 91).

Hole (1973) weist in diesem Zusammenhang auf die Gefahr des "blinden Handelns" hin. Nicht das bloße Vorhandensein von und Hantieren mit konkretem Material, sondern eine handlungsorientierte, verinnerlichende Vorgehensweise im Sinne Piagets ist entscheidend, „die den Übergang von effektiver Handlung zu vorgestellter Handlung bewusst fördern möchte“ (Hole 1973, S. 41; vgl. auch Maier 1999, S. 89).

Bezogen auf das letzte Entwicklungsstadium (ab 11 Jahren) merkt Weinert (1996, S. 35) an, dass nicht nur über konkretes Material hinausgegangen werden kann, sondern auch eine gewisse Fähigkeit zur Introspektion besteht (vgl. Weber 2007, S.91). Da erst in diesem Stadium Handlungen sprachlich dargeboten werden können, fasst Reusser (1998, S. 121) die piagetsche Vier-Stufentheorie zur Denk- und Vorstellungsentwicklung zur Trias "Handeln – Denken – Sprechen" zusammen.

Kritiker Piagets (z.B. Anderson & Albert 1989; Bruner, Olver & Greenfield 1971; Freudenthal 1973; Gardner 1991; Rost 1977; Wygotski 1969) sehen insbesondere in der Nichtberücksichtigung soziokultureller Faktoren wesentliche Forschungsmängel.

Ob sprachliche Repräsentationen von Handlungen im Vorfeld von, begleitend zu, oder im Anschluss an kognitive Repräsentationen stattfinden, wird in den Theorien von Piaget und Galperin aufgrund unterschiedlicher Paradigmen unterschiedlich beschrieben. Im Gegensatz zu Piaget, dessen Forschungsinteresse der Aufdeckung bereits im Menschen angelegter Strukturen gilt, bezieht Galperin soziale Interaktionen und ihren Einfluss auf die kognitive Entwicklung in seine Forschungen mit ein. Insbesondere aufgrund dieser ungleichen ideologischen Forschungsvoraussetzungen lassen sich die Unterschiede in den Theorien erklären, die sich bei Piaget im übergeordneten Dreiklang "Handeln – Denken – Sprechen" von Galperins Überbau "Handeln – Sprechen – Denken" unterscheiden. Als vertiefende Literatur zu Unterschieden beider Theorien sei auf Rausch (1984, S. 203, S. 216 f und S. 253 ff) verwiesen.

Piaget und Galperin gehören beide zu den Begründern einer denkpsychologischen Tradition, welche Denk- und Vorstellungsentwicklung auf verinnerlichtes Handeln zurückführt (vgl. Weber 2007, S. 97). Insgesamt können sie zu den Wegbereitern des Konstruktivismus gezählt werden, bei dem Lernen durch aktive sinnesphysiologische, kognitive, neuronale und soziale Prozesse beeinflusst wird.

... aus allgemeindidaktischer Perspektive

Mit dem operativen Prinzip didaktisiert Piagets Schüler Aebli die entwicklungspsychologischen Erkenntnisse Piagets im Rahmen einer allgemeinen Lern- und Unterrichtstheorie. Den zentralen Bezugspunkt liefert Piagets Grundauffassung "Denken ist verinnerlichtes Handeln".

„Piagets Deutung und Entwicklung kann lernpsychologisch und damit auch didaktisch interpretiert werden, wenn man auf die Annahme einer spontanen Entwicklung verzichtet und an ihrer Stelle annimmt, dass die Schule Bedingungen herstellen kann, die die kindliche Aktivität anregen und steuern und die oben genannten Veränderungen gezielt ermöglichen. So entstehen jene didaktische Regeln, die man als operatives Prinzip benennen kann“ (Aebli 1985, S. 4).

Im Gegensatz zu Piaget, dessen Forschungsinteresse der „Aufdeckung bereits im Menschen angelegter Strukturen“ (Weber 2007, S. 92) galt, ist Aebli der Auffassung, die kognitive Entwicklung könne durch geeignete Maßnahmen von außen beeinflusst werden. Sein Hauptaugenmerk richtet er auf die Fragestellung, wie (schulische) Lern- und Erkenntnisprozesse auf Basis der entwicklungspsychologischen Ergebnisse möglichst günstig initiiert werden können und organisiert sein sollten.

Aebli formuliert seine Theorie des Operativen Prinzips in sieben didaktischen Leitprinzipien:

- „1. Anlässe des Denkens und Lernens sind Probleme, die sich aus Bedürfnissituationen und aus Vornahmen des Handelns, Wahrnehmens und Deutens ergeben.
2. Die Produkte des Denkens und Lernens müssen auf die konkreten Situationen, ihre Objekte und die darin und mit ihnen geplanten Handlungs- und Gestaltungsvornahmen zurückbezogen werden, aus denen sie ursprünglich entsprungen sind. Sie müssen, mit anderen Worten, angewendet werden.
3. Praktische Handlungen und konkrete Wahrnehmungen werden schrittweise zu Handlungs- und Wahrnehmungsvorstellungen verinnerlicht.
4. Gewisse Operationen kann man gewinnen, indem man entsprechende praktische Handlungen und konkrete Vorgänge abstrakt betrachtet.
5. Im Zuge der Interiorisation und der Abstraktion von Handlungen und wahrgenommenen Prozessen zu Operationen müssen diese mit den begrifflichen Mitteln, über die der Schüler verfügt, geklärt und durchsichtig rekonstruiert werden.
6. Operationen und – allgemeiner – Bedeutungen von Begriffen können beweglicher werden, wenn wir sie mannigfaltigen Transformationen unterwerfen und sie unter verschiedenen Gesichtspunkten beleuchten, d.h. durcharbeiten‘.

7. Operationen und Begriffe sind systembildend. Der Unterricht hat die Aufgabe, ihrer Systemhaftigkeit Rechnung zu tragen und alles zu tun, um dem Schüler Einsicht in die Zusammenhänge innerhalb der Operationen und Begriffe zu vermitteln“ (vgl. Aebli 1985, S. 4 ff).

Mit diesen didaktischen Leitprinzipien beschreibt Aebli schulische Denk- und Vorstellungsentwicklung als einen Weg von der Ausführung realer Handlungen, über die Verinnerlichung, Abstraktion und Rekonstruktion von Handlungen, bis zur Bildung eines mentalen Systems von Operationen und Begriffen.

Das Aufbauen von Operationen folgt dabei der Erarbeitung von Handlungsabläufen und geht der Bildung von Begriffen voran (vgl. auch Aebli 1983, S. 203-244). Interiorisation, d.h. die Verinnerlichung realer Handlungen, „bedeutet einen Wechsel des Repräsentationsmediums, mindestens den Übergang von der Wahrnehmung und der effektiven Ausführung [der Handlung] zur Vorstellung, meistens aber auch die Zuordnung einer sprachlichen Formel zur innerlichen Vorstellung und damit die sprachliche Repräsentation des Unterrichtsgegenstandes. [...] Der Übergang von der Handlung und Wahrnehmung zur Vorstellung erfordert jedoch in der Regel mehr als einen Prozess der Interiorisation. [...] Eine operative Didaktik [...] appelliert an dieser Stelle an den Begriff der Abstraktion, den sie aber von der bloßen Sachvorstellung [...] auch auf Handlungen und Prozesse überträgt. [...] Allgemein ausgedrückt: aus konkreten Handlungen werden abstrakte Operationen. Allerdings: Es sind Glücksfälle, wenn in der Vorerfahrung des Lernenden schon eine adäquate gegliederte Handlung vorliegt, [...] in der Regel ist es notwendig, dass die Handlung und der Vorgang im Zuge des Abstraktionsvorgangs zugleich begrifflich rekonstruiert werde.“ (Aebli 1985, S. 5).

Mit der Klärung der Handlung sowie der Wahrnehmung und der daraus resultierenden Konstruktion der Operation spricht Aebli nach meiner Ansicht merkmalsorientierte Analyseprozesse (bei der Durchführung von Handlungen) und damit die Abstraktion von (konkreten) Handlungen an: Durch das Durcharbeiten unterschiedlicher (konkreter) Handlungen innerhalb eines Handlungssystems und durch die auf Merkmale ausgerichtete Analyse (Abstraktion) entwickelt der Lernende einen Begriff und füllt ihn zunehmend mit Inhalt. So kommt er zu einem immer detaillierter werdenden Begriffsinhalt bei gleichzeitiger Abstraktion von den (konkreten) (Einzel-)handlungen. Im

Begriff der Operation manifestiert sich die Abstraktion von der (konkreten) Handlung zu einem System von kognitiven Handlungen.

Insgesamt beschreibt Aebli Denk- und Vorstellungsentwicklung als analytisch-konstruktiven Akt der Abstraktion und Begriffsbildung.

... aus mathematikdidaktischer Perspektive

(i) Wittmanns Interpretation des "Operativen Prinzips"

Im Bereich der Mathematikdidaktik konkretisiert Wittmann das "Operative Prinzip" für den Mathematikunterricht. Mit dem allgemeindidaktischen "Operativen Prinzip" und einer konstruktivistischen Auffassung des Lernens orientiert er sich dabei grundlegend an den Theorien von Piaget und Aebli und legt seiner Idee von Mathematikunterricht damit ihre Sicht des Lernens zugrunde. Darüber hinaus stellt er Bezüge zu Galperin her, dessen Theorie er als „instruktionsorientierte Fassung von Elementen der Piagetschen Theorie“ (Wittmann 1981, S. 113) bezeichnet.

Für den Mathematikunterricht fordert er mit dem "Operativen Prinzip" „[...] die jeweils untersuchten Objekte und das System (,Gruppierung“) der an ihnen ausführbaren Operationen deutlich werden zu lassen und die Schüler auf das Verhalten der Eigenschaften, Beziehungen und Funktionen der Objekte bei den transformierenden Operationen gemäß der Frage ‚Was geschieht mit ..., wenn ...?‘ hinzulenken“ (Wittmann 1981, S. 79). Dabei geht es ihm insgesamt um die systematische Erfassung von Objekten und Operationen.

„'Objekte erfassen' bedeutet zu erforschen, wie sie konstruiert sind und wie sie sich verhalten, wenn auf sie Operationen (Transformationen, Handlungen ...) ausgeübt werden. Daher muß man im Lern- oder Erkenntnisprozeß in systematischer Weise

- (1) untersuchen, welche Operationen ausführbar und wie sie miteinander verknüpft sind,
- (2) herausfinden, welche Eigenschaften und Beziehungen den Objekten durch Konstruktion aufgeprägt werden,

(3) beobachten, welche Wirkungen Operationen auf Eigenschaften und Beziehungen der Objekte haben (Was geschieht mit ..., wenn ...?)“ (Wittmann 1985, S. 9).

Mit Bezug auf Piaget und Galperin betont auch Wittmann den fundamentalen Charakter von Handlungen. Mit seiner Deutung des "Operativen Prinzips" geht es ihm weniger um die Repräsentationsmedien der Objekte (vgl. dazu etwa Bruner et al. 1971). Ebenso formuliert er für die Natur der Objekte einen weiten Rahmen:

„Daher erstreckt sich das operative Prinzip von materiellen oder konkret dargestellten Objekten über abstrakte Objekte, strukturierte Mengen bis hinauf zu ‚Kategorien‘ von Strukturen“ (Wittmann 1985, S. 9). Objekte haben für Wittmann insgesamt nur eine untergeordnete Bedeutung: „Primär wichtig sind die an ihnen ausgeführten Aktivitäten“ (Wittmann 1981, S. 79).

Indem er "Funktionales Denken", "Operatives Üben", "Das heuristische Prinzip der Geometrie von K.-H. Hürten", "Operative (konstruktive) Begriffsbildung" und "Operative Beweise" als besonders wichtige Spezialfälle des "Operativen Prinzips" darstellt, versammelt er alle diese unter dem gemeinsamen Dach einer "Operativen Didaktik".

Aus heutiger Sicht wäre wohl mindestens das Konzept der "Vorstellungsübungen" (vgl. Weber 2007) und in weitgehender Anlehnung an die Meraner Interpretation des funktionalen Denkens das Konzept "Bewegliches Denken im Mathematikunterricht" (vgl. Roth 2005) zu ergänzen.

So lässt sich Wittmanns Deutung des "Operativen Prinzips" insgesamt als didaktisches Leitprinzip zur Denk- und Vorstellungsentwicklung im Mathematikunterricht auffassen, konkretisiert durch die Frage „Was geschieht mit ..., wenn ...?“.

(ii) Das Konzept der Grundvorstellungen

Für Bender (1991) ist die Ausbildung von Grundvorstellungen und Grundverständnis ein "leistungsfähiges Paradigma für die Theorie und Praxis des Mathematikunterrichts; als „didaktisches Prinzip“ formuliert: *Bilde in jedem Gebiet geeignete GVV aus*“ (Bender 1991, S. 48).

Vom Hofe (1995) knüpft hieran an. Er führt unterschiedliche Ansätze aus der Pädagogik, der Psychologie und der deutschsprachigen Mathematikdidaktik zu einer Idee der Grundvorstellung zusammen.

Nach Bender und vom Hofe stehen Grundvorstellungen im Spannungsfeld von Lehr-Lern-Prozessen zwischen normativen Zielvorstellungen, die der Lernende aus fachlich-stoffdidaktischer Sicht bilden soll, und tatsächlich gebildeten Schülervorstellungen, die deskriptiv zu erfassen sind. Neben mathematikunterrichtlicher Prägungen sind diese gemäß der Theorie der "subjektiven Erfahrungsbereiche" (vgl. Bauersfeld 1983) insbesondere durch alltagsweltliche Zusammenhänge "in der Welt der Schüler" beeinflusst:

- [Die deskriptive Komponente]: „Die [tatsächlich aufgebauten] Schülervorstellungen geben dabei Aufschluß über die individuellen Erklärungsmodelle des Schülers, die in das System seiner Erfahrungsbereiche eingebunden und entsprechend aktivierbar sind.
- [Die normative Komponente]: Bei der normativ geprägten Grundvorstellung handelt es sich hingegen um eine didaktische Kategorie des Lehrers, die im Hinblick auf ein didaktisches Ziel aus inhaltlichen Überlegungen hergeleitet wurde und Deutungsmöglichkeiten eines Sachzusammenhangs bzw. dessen mathematischen Kerns beschreibt“ (vom Hofe 1995, S. 123).

Somit beschreibt die Grundvorstellungsidee „Beziehungen zwischen mathematischen Inhalten und dem Phänomen der individuellen Begriffsbildung. In ihren unterschiedlichen Ausprägungen charakterisiert sie mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten insbesondere drei Aspekte dieses Phänomens:

- Sinnkonstituierung eines Begriffs durch Anknüpfung an bekannte Sach- oder Handlungszusammenhänge bzw. Handlungsvorstellungen,
- Aufbau entsprechender (visueller) Repräsentationen bzw. ‚Verinnerlichungen‘, die operatives Handeln auf der Vorstellungsebene ermöglichen,
- Fähigkeit zur Anwendung eines Begriffes auf die Wirklichkeit durch Erkennen der entsprechenden Struktur in Sachzusammenhängen oder durch Modellieren des Sachproblems mit Hilfe der mathematischen Struktur.“ (vom Hofe 1995, S. 97f)

Grundvorstellungen erfassen somit insgesamt „Beziehungen zwischen mathematischen Strukturen, individuell-psychologischen Prozessen und realen Sachzusammenhängen oder kurz: „Beziehungen zwischen Mathematik, Individuum und Realität““ (vom Hofe 1995, S. 98).

Grundvorstellungen wird in diesem Modell eine wichtige Funktion für das Lernen zugeschrieben: Sie tragen den Lernenden in seinem Lernprozess in ein mathematisches Gebiet hinein und entwickeln sich durch die Auseinandersetzung mit diesem weiter. In diesem Sinne verstanden, kann es keine fertigen Grundvorstellungen geben. Vielmehr sind sie als etwas Dynamisches zu verstehen; sie wachsen, entwickeln und ergänzen sich gegenseitig (vgl. vom Hofe 1995, S. 98) zu „einem immer leistungsfähigeren System mentaler mathematischer Modelle“ (vom Hofe 2003, S. 6).

„Der Kern [eines Begriffs] besteht [...] aus einem ganzen System inner- und außermathematischer Zusammenhänge, das in einem langen und verwickelten didaktischen Forschungs- und Entwicklungsprozeß für das Lernen aufbereitet wird. Dieser Prozeß hat eigentlich nie ein Ende. [...] Aus psychologischer Sicht stellt sich der epistemologische Kern [...] als das Gemeinsame der frames [Schemata] aller Beteiligten dar (vgl. etwa Dörfler 1988, S. 65)“ (Bender 1991, S. 49).

Eine zentrale Aufgabe der Lehrperson muss es somit sein, Schülervorstellungen im Lehr- Lern-Prozess zu diagnostizieren und durch geeignete unterrichtliche Maßnahmen weiterzuentwickeln.

Mit seinem Begriffsverständnis von Vorstellungen knüpft vom Hofe, mehr als Bender, an die Tradition Piagets, Aebli und Wittmanns an: Vorstellung kann für vom Hofe „sowohl die Fähigkeit des Vorstellens – einen Denkakt – als auch das Objekt einer Vorstellung – einen Denkgegenstand – bezeichnen“ (Weber, 2007, S. 109).

Zu der Frage – „Wie eigentlich Handlungen zu Operationen verinnerlicht werden?“ – merkt Bender (1991, S.51) kritisch an: „Allerdings entwickeln sich die erwünschten (oder überhaupt welche) Frames [Schemata] keineswegs von selbst. – Für die Schematisierung von mathematischen Operationen aus *Handlungen* hat man in der westlichen Mathematikdidaktik in naiver Adaption der Arbeiten Piagets zur Entwicklung der Intelligenz ja zunächst einen solchen Automatismus unterstellt. Auch als man wieder die Möglichkeit zum Einwirken durch Unterweisungen zu akzeptieren

begann, stellte man sich eine solche Entwicklung als zwar beeinflussbaren, aber dennoch monodirektionalen Verinnerlichungsprozeß vor. Das Problem, wie diese Verinnerlichung vor sich geht, wurde von Dörfler (1988) analysiert: Er sieht „das mathematische Konstrukt [...] als nicht [...] aus der Handlung herauslösbar [...], sondern es tritt konstruktiv-integrativ zu ihr hinzu“ (S. 55). Einerseits ist die reine mathematische Beziehung selbst nicht wahrnehmbar, sondern muß mit Hilfe der Handlung(svorstellung) erschlossen werden, andererseits steuert ihre Antizipation die Handlung(svorstellung) durch Aktivitäten wie die *Interpunktion* (eine Art Setzen von Marken), die *Fokussierung* oder auch *Verlagerung der Aufmerksamkeit* (S. 74f). Dies ist dann wieder auf der Basis von stärker mathematisch elaborierten ‚Handlungen‘ möglich, so daß man an einen hierarchischen Aufbau denken kann (S. 122).“

Mit der Klärung der Handlung und der daraus resultierenden Konstruktion der Operation werden merkmalsorientierte Analyseprozesse – das *Setzen von Marken* durch Beobachtung, *Fokussierung* oder auch *Verlagerung der Aufmerksamkeit* – bei der Durchführung von konkreten und mentalen Handlungen angesprochen, und damit die Abstraktion von (konkreten) Handlungen. Darin manifestiert sich der Dualismus zwischen mathematischer Beziehung und Handlung(svorstellung).

Insgesamt lässt sich das Grundvorstellungskonzept in das Spannungsfeld vorhandener Schüler-Eingangsvorstellungen, fachlich-normativ geprägter Zielvorstellungen und tatsächlich gebildeter Schülervorstellungen einordnen und so aus fachlicher Perspektive als konzeptuell-übergeordnetes Werkzeug zur Denk- und Vorstellungsentwicklung betrachten (und in die Tradition Piagets, Aebli und Wittmanns einbetten).

Für die Unterrichtsforschung liefert das Grundvorstellungskonzept eine deutliche Bereicherung, insbesondere durch

- die Zusammenführung unterschiedlicher Ansätze zu einer Idee der Grundvorstellung,
- die Heraushebung der normativen Funktion von Vorstellungen,
- die angefangene Sammlung von Grundvorstellungen zu Lehrplanthemen,
- Hilfestellung bei der fachdidaktischen Unterrichtsvorbereitung (vgl. Weber 2007, S. 114)
- seine Nutzbarmachung zur Beschreibung von Schülervorstellungen.

Auf praktischer Ebene „macht er [vom Hofe] keine wirklichen unterrichtstauglichen Vorschläge, wie Grundvorstellungen gezielt aufgebaut und wie mit Schülervorstellungen nicht defizitorientiert umgegangen werden könnte“ (Weber 2007, S. 114).

Insbesondere macht er keine Vorschläge, wie mit dem Modell Vorstellungsentwicklungen beschrieben werden können, es lassen sich nur Zustände aufzeigen.

... aus kognitionspsychologischer Perspektive

Auf ihre zentrale Fragestellung, ob "bildhafte Vorstellungen" *überhaupt* existieren und wie (diese als) Informationen gedanklich repräsentiert werden, liefert die Kognitionspsychologie unterschiedliche, ja konträre, Antworten. Mit der Theorie der "Mentalen Modelle" werden diese aufgegriffen und im Rahmen einer dualistischen Lerntheorie zur Wissensaneignung und internen Wissensrepräsentation durch die Pädagogische Psychologie relativierend zusammengeführt und damit konstruktiv nutzbar gemacht.

Im Folgenden stelle ich überblicksartig einige Theorien zu dem Konstrukt "bildhafte Vorstellung" dar und erläutere im Anschluss die Theorie der Mentalen Modelle näher. Unter einer bildhaften Vorstellung versteht man im Allgemeinen eine mentale Repräsentation eines nicht vorhandenen Objektes oder Ereignisses. Neben visuellen Bildern umfasst diese Definition auch Bilder, die durch andere Sinne gebildet werden.

(i) Die "Dual-Coding-Hypothese" (Paivio 1971)

Paivio (1971) beschreibt mit seiner dualen Codierungstheorie zwei Codes und zwei Speichersysteme zur Verarbeitung von Informationen im menschlichen Gehirn: Im verbalen System werden demnach sprachliche Informationen verarbeitet, im imaginalen System bildhafte Informationen. Seine Forschungen ergaben, dass Sätze oder Texte vorwiegend im verbalen System encodiert werden, während Bilder grundsätzlich in beiden Systemen, also imaginal und verbal encodiert werden.

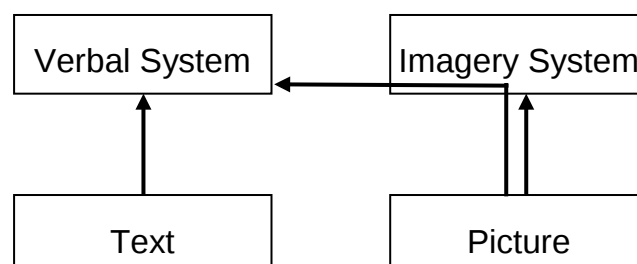


Abbildung 7: Die „Duale Codierungstheorie“ nach Paivio (1971)

„Das gute Behalten von Bildern wird hier auf die Vorzüge einer doppelten gegenüber einer einfachen Codierung zurückgeführt“ (Schnotz 2002, S. 67). Durch die Untersuchungen von Clark & Paivio (1991) erfahren Paivios Modellannahmen auf haptische Wahrnehmung bezogene sinnesphysiologische Erweiterungen und werden durch verhaltenswissenschaftliche und neurologische Befunde weiter gestützt (vgl. Solso & Reiss 2005, S. 289).

(ii) Die konzeptuell-propositionale Hypothese (Anderson & Bower 1973, Pylyshyn 1973)

Nach Anderson & Bower ist es wissenschaftlich nicht zulässig, von der Annahme auszugehen, „dass man Erinnerungen oder andere Arten des Wissens in einer Form mit sich herumträgt, die einem inneren Foto, einem Videoband oder einer Tonaufzeichnung ähnelt, die wir beim Erinnern eines Bildes reaktivieren und noch einmal vorspielen können“ (Anderson & Bower 1973, S. 453).

Anderson & Bower lehnen die Theorie von Bildern im Kopf mit folgendem Erhaltungsargument grundsätzlich ab: Es sei nutzlos, vollständige Bilder von Szenen zu speichern, weil ein derartiges „Gedächtnissystem eine Speicherung und einen Abruf erfordern würde, die jenseits der menschlichen Fähigkeiten liegen. Um diese inneren Bilder zu betrachten und zu interpretieren, wäre zudem noch ein bestimmter Apparat – eine Art Überhomunculus – erforderlich“ (Solso & Reiss 2005, S. 273).

In ihrer konzeptuell-propositionalen Theorie nehmen sie an, dass visuelle und verbale Informationen in Form abstrakter Propositionen über Objekte, Ereignisse und ihre Beziehungen zueinander mental repräsentiert werden (vgl. Solso & Reiss 2005, S. 289). Unter einer Proposition verstehen sie „die kleinste Wissenseinheit, die eine selbständige [von anderen Wissenseinheiten unabhängige] Aussage bilden kann“ (Anderson 1996, S. 141). Nicht die imaginalen Komponenten verbaler oder visueller Informationen werden ihrer Annahme nach gespeichert, sondern deren Interpretationen, also Bedeutungen. Der einzige Unterschied zwischen einer mentalen Repräsentation zu einer verbalen und zu einer visuellen Information besteht nach Anderson & Bower in der Detailliertheit aufgenommener Informationen (vgl. Anderson & Bower 1973, S. 460).

Auch Pylyshyn (1973, 1981) geht davon aus, dass Propositionen von den individuellen Eigenschaften eines einzelnen informationstragenden Ereignisses abstrahieren und den allgemeinen Sinn einer Information repräsentieren. In diesem Modell ist auch die Vorstellung visueller Informationen, beispielsweise eines roten Balls in Form der Proposition - Ball, rot - gespeichert und nicht als mentales Bild. Insgesamt postuliert Pylyshyn eine einheitliche, propositionale Metasprache des Geistes.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine Proposition den Bedeutungsgehalt von sprachlicher oder bildhafter Repräsentation einer Information darstellt und als Resultat des entsprechenden Abstraktionsprozesses beschrieben werden kann.

Die konzeptuell-propositionale Hypothese findet breite Anerkennung in der Kognitionspsychologie. Sie steht aber im Gegensatz zu Forschungsergebnissen, die auf eine funktionale Äquivalenz zwischen Wahrnehmung und Vorstellung hinweisen, und kann diese nicht erklären.

(iii) Die Hypothese von der funktionalen Äquivalenz zwischen Wahrnehmung und Vorstellung (Shepard 1968, Kosslyn 1973)

Shepard untersuchte die mentale Rotation mit Hilfe von visuell dargebotenen Konfigurationen zusammengesetzter Würfel zu Würfelfiguren. Seine Ergebnisse deuten darauf hin, „dass im Mentalen Bilder existieren, die, wenn sie auch nicht strukturell identisch mit den Objekten der realen Welt sind, so doch zumindest funktional miteinander zusammenhängen“ (Solso & Reiss 2005, S. 275).

Diesen funktional äquivalenten Zusammenhang zwischen den äußeren Objekten und ihren inneren Repräsentationen, also zwischen Funktionsweisen von Objekten der Wahrnehmung und Funktionsweisen von Objekten der Vorstellung, bezeichnet Shepard (1968) als Isomorphismus zweiter Ordnung und betont hiermit insbesondere die Ähnlichkeit zwischen dem Ablauf innerer und äußerer Zusammenhänge.

Kosslyn (1973, 1975, 1976a, 1976b, 1977, 1980, 1981, 1994, 1995) untersuchte die bildhafte Vorstellung im Hinblick auf ihre räumlichen Eigenschaften. Mit seinen Forschungsergebnissen zeigt er, „dass ein mentales Bild der Wahrnehmung eines realen Objektes ähnlich ist“ (Solso & Reiss 2005, S. 275). Farah (1988) nimmt zudem an, dass Informationen sowohl in visueller als auch in räumlicher Form innerhalb „un-

terschiedlicher Subsysteme für Repräsentationen bildhafter Vorstellung“ als „visual or nonvisual spatial representations“ vorliegen können (vgl. ebd., S. 309).

Zusammenfassend legen Shepards und Kosslyns Forschungen nahe, dass visuelle Bilder innere Repräsentationen hervorrufen, die der Wahrnehmung physikalischer Objekte und ihrer Funktionsweise entsprechen.

Auch Erkenntnisse der neurokognitionspsychologischen Forschung (etwa Farah 1995; Kosslyn 1994; Kosslyn et al. 1993, 1995) stützen die Hypothese der funktionalen Äquivalenz: Sie zeigen, dass die gleichen Bereiche des Gehirns bei der Objekt-, bzw. Prozess-Wahrnehmung (Sehen) und -Vorstellung aktiv sind.

Dieses legt den Schluss nahe, dass visuelle Vorstellungen und visuelle Wahrnehmungen auf den gleichen kognitiven Mechanismen basieren. Visuelle Vorstellungen können demnach als wahrnehmungsnahe Repräsentationen interpretiert werden (vgl. Kosslyn 1994; Kosslyn & Moulton 2009).

Zusammenhängende Betrachtung

Die dargestellten, zum Teil sehr gegensätzlichen "Modelle" (insbesondere das 2. und 3. Modell) werden in der seit den 70-er Jahren andauernden Mental Imagery-Debatte durch ihre Hauptvertreter Kosslyn und Pylyshyn mit immer wieder neuen Forschungsergebnissen verfestigt.

„Bestenfalls ... wird sich die Kontroverse ‚Bildhafte Vorstellung kontra Propositionen ... auf die Frage reduzieren lassen, aus welcher Interpretation sich die eleganteste Erklärung für welche Phänomene ergibt“ (Anderson 1976, zitiert nach Solso 2005).

Im Kontext dieser "andauernden Diskussion", ob bildhafte Vorstellungen und Wahrnehmungen einander ähnlich sind, oder ob mentale Objekte und Prozesse in Form der Wissensbasis eines Menschen intern propositional repräsentiert werden, liefert die Theorie der "Mentalen Modelle" eine relativierende und zugleich verbindende Sichtweise. Das Modell bezieht bildhaft-analoge sowie propositionale interne Repräsentationen ein und beschreibt die Vorstellungsentwicklung als eine Wechselwirkung dieser Repräsentationsformen.

Mentale Modelle

In der Kognitiven und Pädagogischen Psychologie lassen sich seit Craik (1943) zahlreiche Beiträge zur Konstruktion und Beschreibung von mentalen Modellen finden (Genter & Stevens, 1983; Johnson-Laird, 2005; Oakhill & Garnham, 1996).

„Mentale Modelle gelten als geistige Repräsentationen von Situationen, realen oder imaginären. Sie werden aufgrund von Erfahrungen und anderen erlernten Informationen entwickelt und dann als Werkzeuge für Verstehen und schlussfolgerndes Denken (z.B. Antizipieren von Ereignissen) genutzt. Mentale Modelle zu einem Sachverhalt können bei Experten oder Laien mehr oder weniger gut elaboriert sein. Ein schlechtes oder falsches mentales Modell bedeutet, dass der Betreffende den Sachverhalt nicht wirklich verstanden hat. Ein Kennzeichen von mentalen Modellen ist, dass sie dynamisch sind, denn sie sind ja Modelle für Ereignisse und Abläufe. Sie machen das dynamische Zusammenspiel dieser Elemente nachvollziehbar“ (Weidenmann 2008, S. 152).

Schnotz & Bannert (1999a, S. 79f) sehen in mentalen Modellen „eine sensorisch unspezifische Form der depiktionalen Repräsentation, da die zur Modellkonstruktion erforderliche Information über verschiedene Sinnesmodalitäten gewonnen werden kann und ein solches Modell auch Sachverhalte repräsentiert, die der Wahrnehmung nicht zugänglich sind.“

Johnson-Laird (1989) charakterisiert mentale Modelle im Hinblick auf räumliche, zeitliche oder kausale Relationen als strukturell analog zur Realität.

Insgesamt existiert kein einheitliches Begriffsverständnis zu mentalen Modellen. Es soll und kann im Rahmen dieser Arbeit auch nicht darum gehen, die Verschiedenheit bestehender psychologischer Begriffsverständnisse aufzuzeigen. Ein aus mathematikdidaktischer Perspektive handhabbares Verständnis weist die Auffassung von Schnotz (2006a) auf, und diese lege ich meiner Arbeit zu Grunde.

Schnotz versteht unter einem mentalen Modell „ein internes (hypothetisches) Quasi-Objekt, das in einer Struktur- oder Funktionsanalogie zum jeweiligen Wissensgegenstand steht und den Gegenstand aufgrund dieser Analogie repräsentiert. [...] Zum einen führen Modellkonstruktionsprozesse, die von der propositionalen Repräsenta-

tion ausgehen, zum Aufbau oder zur Veränderung eines mentalen Modells [...] Zum anderen werden an einem mentalen Modell jeweils neue Informationen abgelesen und der propositionalen Repräsentation hinzugefügt“ (Schnotz 2006a, S. 79).

Mit dieser Beschreibung verdeutlicht Schnotz, dass interne Repräsentationen in unterstützender Wechselwirkung miteinander stehen. Auch Kintsch (1998) hebt mit dem „Aufeinander-Angewiesen-Sein“ beider Repräsentationsarten den Wechselwirkungscharakter in individuellen Entwicklungsprozessen mentaler Repräsentationen hervor. Nach Schnotz (1994a, 1994b) besteht eine propositionale (interne) Repräsentation aus diskreten Informationseinheiten, während mentale Modelle ganzheitliche Abbildungen beinhalten. Propositionale interne Repräsentationen werden in der Kognitionspsychologie als deskriptionale Repräsentationen charakterisiert, da diese internen Deskriptionen den repräsentierten Gegenstand mit Hilfe von Symbolen beschreiben. Im Vergleich zu den internen bildhaften, depiktionalen Repräsentationen (visuelle analoge Vorstellungen und mentale Modelle) wird ihnen eine höhere Ausdrucksmächtigkeit zuerkannt. „Andererseits enthalten depiktionale Repräsentationen jeweils die Gesamtheit einer bestimmten Informationsklasse und eignen sich insofern besser, Inferenzen zu vollziehen, da die gesuchte Information an der Repräsentation direkt abgelesen werden kann“ (Schnotz & Bannert 1999a, S. 79).

Allem Anschein nach ist es vernünftig davon auszugehen, dass Informationen auf einem bestimmten Verarbeitungsniveau bildhaft kodiert werden, während die gleichen Informationen auf einem anderen Verarbeitungsniveau propositional kodiert werden (vgl. Solso & Reiss 2005, S. 289).

Zudem besteht ein „besonders wichtiges Merkmal mentaler Modelle [...] darin, dass sie es erlauben, das Verhalten dynamischer Systeme [mental] zu simulieren“ (Schiefele & Schaffner 2006, S. 867).

Vorstellungsentwicklung kann unter diesem Blickwinkel als ein allmählicher und kontinuierlicher Entwicklungsprozess von mentalen Initialmodellen zu "ausgeschärften", wissenschaftlich korrekten Modellen beschrieben werden.

Mit Blick auf die Fragestellung dieser Arbeit stellt der Ansatz der mentalen Modelle eine geeignete Ausgangsbasis dar. Er liefert ein Ideen- und Vokabelrepertoire, welches genutzt und ggf. weiterentwickelt werden kann.

2 Lernen mit dem Computer

2.1 Status quo: Computerunterstütztes Lernen

Die vorliegende Untersuchung widmet sich der Frage, welchen Einfluss Computera-
nimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung bei Grundschulern haben können.

In der Mathematikdidaktik für die Grundschule gibt es nur sehr wenige systematische
Forschungsergebnisse, auf die man aufbauen könnte. Dies bemängelt z.B. auch
Krauthausen (2008). Die vorliegenden Ergebnisse sind sehr punktuell.

So konnte Harrass (2007) zeigen, dass sich das Üben am Computer nicht generell
vom herkömmlichen Üben (außerhalb von Computerumgebungen) unterscheidet, so
dass an die Organisation der Lernprozesse gleiche (didaktische) Anforderungen ge-
stellt werden sollten wie an einen *guten* Mathematikunterricht generell. Auch Kerres
(2001) weist bei der übergeordneten Frage um den Mehrwert digitaler Medien in
Lernprozessen allgemein darauf hin, „dass das Lernen mit Multi- und Telemedien
grundsätzlich die gleichen methodischen Modellvorstellungen des didaktischen De-
signs impliziert wie andere Angebotsformen (vgl. Kerres 2001, S. 109).“

Das Fehlen von Forschungsergebnissen spiegelt sich auch in den "Bildungsstan-
dards für die Grundschule: Mathematik konkret" wieder (Walther et al. 2008): Wohl
betonen die Autoren Wollring & Rinkens (ebd., S. 140) beim Inhaltsbereich "Raum
und Form", dass „eine positive Perspektive für [diesen] Inhaltsbereich [...] ein ange-
messenes Nutzen neuer Medien [bildet].“ Ebenso zeigen die Autoren Krauthausen &
Lorenz (ebd., S. 162ff) im Kapitel "Computereinsatz im Mathematikunterricht" unter
dem Primat der Fachdidaktik auf, „was der Computer sein kann und was nicht“ und
welche Möglichkeiten im Zusammenhang mit inhaltsbezogenen und allgemeinen ma-
thematischen Kompetenzen durch den Computereinsatz geboten werden.

Referenzen bezüglich Wirksamkeitsforschung *müssen* jedoch fehlen, und die Dar-
stellungen verbleiben insgesamt deskriptiv auf der Erfahrungsebene mit einer positiv-
hoffnungsvollen Perspektive.

2.1.1 Befundlage in der empirischen Forschung

Aus dem qualitativ-interpretativen Forschungsparadigma konnte ich keine einschlägigen Ergebnisse ausfindig machen. Dagegen liegen am Rande meines Forschungsvorhabens quantitative Arbeiten in Form von Methodenvergleichsuntersuchungen vor, bei denen computerunterstützte Lernumgebungen zur Förderung räumlicher Fähigkeiten mit materialunterstützten Lernumgebungen verglichen werden (s. etwa Hellmich & Hartmann 2002a; Jöckel & Reiss 1999; Leutner & Kretschmar 1988; Reiss & Albrecht 1994; Schumann 2004).

Im Zentrum dieser Untersuchungen stehen verschiedene Forschungsfragen:

Welche unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien und Fehler lassen sich in den verschiedenen Lernumgebungen beobachten? Jöckel & Reiss (1999) konnten diesbezüglich keine Unterschiede feststellen.

Welche unterschiedlichen Fördereffekte haben Lernumgebungen mit und ohne Computereinsatz im Hinblick auf räumliche Fähigkeiten? Reiss & Albrecht (1994) und Leutner & Kretschmar (1988) konnten diesbezüglich keine Unterschiede feststellen.

Findet überhaupt eine Förderung räumlicher Fähigkeiten in einer computerunterstützten Lernumgebung statt? Schumann (2004) weist diesbezüglich nach, dass eine Förderung räumlicher Fähigkeiten in computerunterstützten Lernumgebungen stattfindet, auch wenn keine signifikanten Unterschiede zu materialgestützten Lernumgebungen festzumachen sind. Hingegen stellen Hellmich & Hartmann (2002a) heraus, dass sich – bei ihrem Design – sowohl in der computer- als auch in der materialgestützten Lernumgebung keine generelle Förderung räumlicher Kompetenzen und zudem keine signifikanten Unterschiede zwischen computer- und materialunterstützter Förderung beobachten lassen. In einer Folgestudie (Hellmich & Hartmann, 2002b, S. 59f) konnten die beiden jedoch „eine deutliche Förderung von Fähigkeiten erkennen, die eng mit der computergestützten Lerneinheit zusammenhängen [...]“.

Gibt es einen Transfer „von gezielten Übungen im Bereich räumlicher Kompetenzen auf Leistungen im Geometrieunterricht“? So belegen Masendorf, Kullik & Heyland (1997), dass Transferleistungen auf den Geometrieunterricht überhaupt sehr schwierig sind. Hellmich & Hartmann (2002a, b) untermauern diese Ergebnisse.

Lassen sich leistungsbezogene Effekte beobachten? Solche bestehen nach Hellmich & Hartmann (2002b, S. 60) insbesondere für leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler. „Sie sind wahrscheinlich in stärkerem Maße in der Lage, das vorgegebene Lehr- Lernarrangement für sich zu nutzen“ und selbstständig mit Aufgaben und Problemen in der computerunterstützten Lernumgebung umzugehen. [...] „Die schwächeren Schüler sind [hingegen] nicht in der Lage, ohne gezielte Hilfen, Übungen oder Wiederholung das erworbene Wissen zu verinnerlichen (vgl. ebd., S. 60).“ Gemäß einer Nachuntersuchung in einem zeitlichen Abstand von einem halben Jahr seien die beschriebenen Effektauswirkungen jedoch nicht nachhaltig (vgl. ebd., S. 59).

Vorwiegend aus psychologischer Perspektive (vgl. etwa Dorval & Pépin 1986; Forsyth & Lancy 1987; Gagnon 1985; Green & Bavelier 2003; Greenfield, Brannon & Lohr 1994; Lowery & Knirk 1982; McClurg & Chaille 1987; Quaiser-Pohl et al. 2001; Subrahmanyam & Greenfield 1994) aber auch aus Sicht der Lernbehindertenpädagogik (vgl. etwa Masendorf 1993, 1994; Masendorf, Kullik & Heyland 1997; Souvignier 2000) liegen quantitative Arbeiten vor, die sich mit der computerunterstützten Förderung räumlicher Fähigkeiten, insbesondere unter dem Einsatz von Computerspielen, auseinandersetzen.

Dabei haben sich in variierenden Untersuchungsdesigns „Computerspiele als generell wirksam zur Förderung räumlicher Fähigkeiten [erwiesen]. Die allgemeine Wirksamkeit solcher Computerspiele kann insbesondere deswegen als recht stabil angesehen werden, weil sie über verschiedene Computerspiele, unterschiedliche Trainingsdauern und variierte Kriterien repliziert werden konnte“ (Hellmich & Hartmann 2002b, S. 57).

Zur Verdeutlichung werden im Folgenden einige Detailbetrachtungen dargestellt:

Lowery & Knirk (1982) kommen zu dem Schluss, dass Computerspiele durch ihre Geschwindigkeit im Spielverlauf und insbesondere durch ständige Wiederholungen räumliche Fähigkeiten fördern.

Subrahmanyam & Greenfield (1994) stellen vor allem für Teilnehmer mit anfänglich vergleichsweise schlechten räumlichen Fähigkeiten einen besonderen Nutzen von Computerspielen fest.

Greenfield, Brannon und Lohr (1994) betonen eine signifikante Verbesserung räumlicher Fähigkeiten nur bei längerer Nutzung über einen Zeitraum von mehreren Tagen.

Green & Bavelier (2003) konnten in mehreren mittelfristig angelegten Untersuchungen eine förderliche Wirkung speziell durch den Einsatz von 3-D-Actionspielen herausarbeiten. Zudem untersuchten sie den Einfluss unterschiedlicher Arten von Computerspielen auf die Veränderung räumlicher Fähigkeiten. Bei einem Wirkungsforschungsvergleich der Spiele "Tetris" und "Medal of Honor" (einem damals aktuellen 3-D-Actionspiel) stellten sie fest, dass eine signifikante Verbesserung räumlicher Fähigkeiten nur bei dem 3-D-Actionspiel auszumachen ist. Sie interpretieren dieses Ergebnis vor dem Hintergrund der mentalen Anforderungen, die durch die jeweiligen Spiele an die Probanden gestellt werden. Um Tetris erfolgreich zu spielen, sind vorwiegend mentale Objektmanipulationen – und damit die Konzentration auf eben dieses jeweilige Objekt notwendig, wohingegen 3-D-Spiele die Aufmerksamkeit auf einen größeren Bereich lenken und es dadurch notwendig machen, die reale und mentale Betrachterperspektive ständig zu wechseln.

Quaiser-Pohl et al. (2001) untersuchten den Einfluss des Computers auf die Raumvorstellung, indem sie Studierende der Computerwissenschaften mit Studierenden von computerferneren Studiengängen verglichen. „Ein fördernder Einfluss von Computerspielen auf die Raumvorstellung zeigt sich besonders bei Personen mit wenig Computererfahrung. Die differentielle Bedeutung von bestimmten Spielformen weist darauf hin, dass Spiele, bei denen mit 3-D-Objekten und räumlichen Konstellationen konstruktiv dynamisch umgegangen werden muss, hier besonders förderlich sind“ (ebd., S. 5).

Gemäß aller dieser Studien ergibt sich eine Verbesserung räumlicher Fähigkeiten durch den Einsatz von 3-D-Computerspielen. Diese positiven Effekte lassen sich in unterschiedlichen Ausprägungen und unterschiedlichen Teilfaktoren des räumlichen Vorstellungsvermögens, vorwiegend für die Thurstoneschen Teilfaktoren "Räumliche Orientierung" und "Visualisierung" festmachen. Offensichtlich werden diese in besonderem Maße von 3-D-Spielen angesprochen.

Dabei bleibt jedoch kritisch zu bedenken, dass die meisten der hier aufgeführten Studien sich auf die Untersuchung eines einzelnen Spiels stützen, was bei den doch

recht unterschiedlichen Spielen und dem sich rasant entwickelndem Spielmarkt zumindest zu hinterfragen ist.

In sämtlichen hier aufgeführten mathematikdidaktischen, psychologischen und lernpädagogischen Arbeiten wurde jeweils mit einem Experimental- Kontrollgruppen-design gearbeitet. Forschungsmethodisch wird dabei zu einem Zeitpunkt A eine erste Momentaufnahme erhoben. Im Anschluss daran erfolgt eine gezielte Intervention innerhalb medial unterschiedlicher Lernumgebungen. Zum Zeitpunkt B erfolgt eine erneute Momentaufnahme, deren Erkenntnisse Aufschluss geben sollen über die bewirkte Veränderung. Der Einfluss der Intervention wird demnach als "Differenz" einzelner Momentaufnahmen interpretiert.

Dass derartige Forschungen nur eingeschränkten Wert haben, bemerkt z.B. Kerres (2001, S. 106f): „Ein weiteres Problem besteht bereits darin, dass die Vergleichsgröße „personaler Unterricht“ [wie auch die Vergleichsgröße „räumliches Vorstellungsvermögen“] weniger gut operationalisierbar ist. Der Unterricht wird kaum exakt definierbar sein, wie dies beim computergestützten Lernen durch [...] [ein] Programm gegeben ist. Es lässt sich kaum explizieren, was bei derartigen Vergleichsstudien überhaupt verglichen wird. [...] Eine globale Gegenüberstellung verschiedener *treatments* in Einzeluntersuchungen bleibt [...] im Grunde wenig aussagekräftig. Eine grundsätzliche Klärung der Überlegenheit bestimmter Mediensysteme für Lehr-Lernzwecke, auch wenn sie öfters gefordert wird, ist als wenig ergiebige Forschungsfrage zu bewerten.“ Die meisten Untersuchungen geben sich heute mit dem Nachweis zufrieden, dass Lernen mit neuen Medien keine schlechteren Ergebnisse produziert als konventionelles Lernen (vgl. ebd., S. 107).

Darüber hinaus liefern derartige faktorenanalytische Testverfahren zwar Werkzeuge zur Erfassung von Momentaufnahmen. Die Möglichkeit der Beschreibung einer *kontinuierlichen* Entwicklung bieten sie aber nicht.

Im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit, wie Computeranimationen die Raumvorstellungsentwicklung beeinflussen, sind sie somit weniger gut geeignet, um modelltheoretisch zu beschreiben, wie die Fähigkeiten entwickelt werden und welche Einflussfaktoren in welcher Weise auf die Entwicklung einwirken.

2.1.2 Befundlage in der Metaanalyse

Die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Ergebnisse spiegeln sich zu einem großen Teil auch in den Erkenntnissen von Metaanalysen überhaupt zu mediengestütztem Lernen, beispielsweise von Kulik & Kulik (1989, 1991) und Kulik (1994) wieder.

Sie untersuchten die Effektstärke mehrerer hundert Einzelstudien zum CBT (Computer Based Training). Im Durchschnitt stellten sie kleinere Effektstärken fest. Größere Effektstärken zeigten sich bei lernbehinderten Kindern im sonderpädagogischen Bereich. Bei der Lerndauer konnte allgemein eine Reduktion um 30% bei dem Einsatz von CBT gegenüber konventionellem Unterricht beobachtet werden. Kerres (2001, S. 104) hält dazu fest: „Für Personen, die genügend Motivation und Persistenz in ihrem Lernverhalten aufweisen, lässt sich mit mediengestützten Maßnahmen die Lerndauer verkürzen! Gleichwohl muss bei Personen mit geringem Interesse und wenig selbständiger Lernerfahrung mit einer höheren Abbrecherquote gerechnet werden!“

Zusammenfassend interpretiert er die Befundlage mehrerer Metaanalysen und die dort beschriebenen Konsequenzen (Achtenhagen 2000; Fricke 1991; Issing 1988; Keegan 1986; Kulik 1994; Kulik & Kulik 1989, 1991; Kulik, Kulik & Schwalb 1986; McNeil & Nelson 1991; Mevarech, Shir & Movshovitz-Hadar 1992; Moore & Kearsley 1996; Niemiec, Sikorski & Walberg 1989; Niculescu 1995; Reeves 1993; Russell 1999; Weidenmann 1995; Wetzel, Radtke & Stern 1993; Witte 1995) als Nachweis, „dass mediengestützte Lernverfahren anderen Varianten nicht *unterlegen* sind. Besondere Vorteile des mediengestützten, selbstorganisierten Lernens zeigen sich im Hinblick auf die *Lerndauer* für Personen mit hoher Lernmotivation und selbständigem Lernverhalten, die das mediale Lernangebot tatsächlich zu einer intensiven kognitiven Auseinandersetzung nutzen. Gleichwohl wird deutlich, dass für den Lernerfolg die [didaktische] Qualität der *Medienkonzeption* und nicht das Mediensystem an sich ausschlaggebend ist“ (vgl. ebd., S.111).

Mit diesem Fazit verweist Kerres abermals auf den Primat der Fachdidaktik für die Entwicklung und den Einsatz medialer Lernangebote.

2.1.3 Resümee

Hinsichtlich des Computereinsatzes im Mathematikunterricht der Grundschule offenbart sich ein eklatanter Mangel an Forschungsergebnissen aus mathematikdidaktischer Perspektive.

Viele quantitative Methodenvergleichsuntersuchungen zur Förderung räumlicher Fähigkeiten beschäftigen sich mit der Wirksamkeit computerunterstützten Lernens. Im Fokus steht dabei zumeist die Frage, ob sich ein Mediensystem, bzw. welches Mediensystem sich in dem spezifischen Kontext besonders eignet, um bestimmte didaktische Ziele zu erreichen. Übergeordnet schwingt dabei die Frage mit, ob mit dem Einsatz neuer Medien bestimmte pädagogische Vorstellungen erreicht werden können, die zuvor nicht oder nur aufwändig realisierbar waren.

Die Aussagekraft derartiger Untersuchungen wird von Kerres (2001) generell in Frage gestellt. Die Relevanz für das Forschungsvorhaben meiner Arbeit erscheint gering, da es in den beschriebenen Untersuchungen zumeist in einem allgemeineren Sinne um die Wirksamkeit computerunterstützter Lernumgebungen geht und sich die Forschungsfragen nicht speziell mit dem Einfluss von Animationen auf die Vorstellungsentwicklung beschäftigen. Insbesondere liegt in diesem Zusammenhang keine qualitativ-interpretative Forschung aus mathematikdidaktischer Perspektive vor.

Im Gegensatz dazu erweist sich die Lehr- Lernforschung der Pädagogischen und Kognitiven Psychologie für diese Arbeit als geeigneter theoretischer Rahmen für das Lernen mit Neuen Medien.

2.2 Die Cognitive Load Theory (CLT)

Mit der CLT (Chandler & Sweller 1991; Sweller, van Merriënboër & Paas 1998; Sweller 2005) wird ein Modell vorgestellt, welches die unterschiedlichen Formen und Entstehungsarten kognitiver Be- bzw. Überlastungen während der kognitiven Verarbeitung von Informationen im kapazitiv begrenzten Arbeitsgedächtnis beschreibt und daraus Konsequenzen für die instruktionale Gestaltung von Lehrmaterialien ableitet.

Grundlagen

Die CLT geht von einer begrenzten Verarbeitungskapazität und von getrennten Verarbeitungskanälen für visuelle und auditive Informationen im Arbeitsgedächtnis aus. Demnach kann zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eine bestimmte Menge an Informationen gleichzeitig verarbeitet werden. Nach Sweller (2002) ist das Verstehen von Informationen gleichbedeutend mit der Fähigkeit und der Möglichkeit, alle relevanten Informationselemente im Arbeitsgedächtnis simultan verarbeiten zu können. Dabei bezieht sich "Fähigkeit" auf die individuumsintern gegebenen Bedingungen und "Möglichkeit" auf die äußerliche Gestaltung der Informationen.

Der eigentliche Verarbeitungs- und Lernprozess wird von Chandler & Sweller (1991) im Sinne der Assimilation und Akkomodation (vgl. Piaget 1975) als Schemakonstruktion und Schemaautomation charakterisiert: Im Lernprozess werden bereits vorhandene Schemata aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen, ins Arbeitsgedächtnis transferiert und dort mit neuen Informationen ergänzt oder kombiniert. Wissenserwerb bedeutet demnach, bestehende Schemata zu erweitern, umzustrukturieren und neue Schemata zu konstruieren. Diese werden im kapazitativ nahezu unbegrenzten Langzeitgedächtnis in unterschiedlichen Automationsgraden abgespeichert (vgl. auch Sweller 2002, Sweller, van Merrienboër & Paas 1998).

Wissenserwerb ist abhängig von der mentalen Belastung. Diese wird von der Informationsverarbeitungskapazität des Lernenden und von der instruktionalen Gestaltung des Lernmaterials bestimmt:

„Erfordert etwa die Art der Lehrmaterialpräsentation das simultane Bereithalten und Integrieren verschiedener Informationen im Arbeitsgedächtnis, ist dies mental anstrengender als die Verarbeitung bereits vorstrukturierter, integrierter Information. Dadurch stehen bei letzterem mehr kognitive Ressourcen für den eigentlichen Lernprozess zur Verfügung, was wiederum den Wissenserwerb fördert. (Cognitiv-Load-Theory nach Chandler & Sweller 1991, 1992; Mousavi, Low & Sweller 1995; Sweller, van Merrienboër & Paas 1998)“ (Brünken, Seufert & Leutner 2008, S. 305).

Kognitive Ressourcen, die für das Behalten und mentale Integrieren einzelner Informationen im Arbeitsgedächtnis benötigt werden, stehen für den eigentlichen Wis-

senserwerb nicht zur Verfügung. Je höher „die kognitive Belastung bei der Informationsaufnahme ist, umso niedriger ist [...] der Wissenserwerb“ (vgl. ebd., S. 305).

Demzufolge sollte Informationsdarbietung und Instruktionsdesign so gestaltet werden, dass möglichst viele mentale Ressourcen für den eigentlichen Lernprozess zur Verfügung stehen können, diese also nicht durch für das Lernen unwesentliche Prozesse mental belegt sind und keine unnötigen mentalen Überlast-Situationen durch beispielsweise zu komplexe Lernangebote entstehen.

Die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses während eines Lernprozesses wird anhand von drei unterschiedlichen Formen des Cognitive Load beschrieben. Diese lassen sich nach Sweller, van Merriënboër & Paas (1998) gemäß ihrer jeweiligen Ursache kategorisieren. Mögliche Quellen kognitiver Belastung entstehen durch

- die zu lernenden Inhalte selbst (Intrinsic Cognitive Load)
 - die Art und Weise der Informationspräsentation (Extraneous Cognitive Load)
 - den Prozess der Informationsverarbeitung selbst (Germane Cognitive Load)
- (vgl. auch Brünken & Leutner 2008, S. 557).

Intrinsic Cognitive Load

Diese Form kognitiver Belastung ergibt sich aus den Eigenschaften der zu lernenden Inhalte selbst. Sie ist abhängig von dem Schwierigkeitsgrad, der Komplexität und dem Umfang des Lernmaterials und folglich auch von bereits vorhandenem individuellem Vorwissen des Lernalers.

„Lerninhalte lassen sich danach unterscheiden, ob Informationselemente sequentiell verarbeitet werden können oder simultan im Arbeitsgedächtnis gehalten werden müssen, weil sie untereinander interagieren (Sweller, 2002)“ (Rubitzko 2006, S. 74). Diese als Element-Interaktivität (*element interactivity*) bezeichnete Eigenschaft bestimmt den Schwierigkeitsgrad eines angebotenen Lerninhalts.

Weisen Lerninhalte eine hohe Element-Interaktivität auf, so ist dies nach Auffassung von Marcus, Cooper & Sweller (1996) gleichbedeutend mit einer hohen kapazitativen Belastung des Arbeitsgedächtnisses, da „die Funktionsweise eines Elements nicht verstanden werden kann, ohne die Funktionsweisen weiterer Elemente zu kennen. [Der Lernende muss in diesem Fall sehr viele Zusammenhänge zwischen den einzelnen Inhalten (Sinneinheiten; Chunks) eigenständig] konstruieren, um den gesamten

Sachverhalt angemessen zu verstehen“ (Niegemann 2008, S. 46). Derartige Lerninhalte sind somit schwerer zu verstehen.

Lerninhalte mit nicht interagierenden Sinneinheiten können hingegen separat und damit sequenziell verarbeitet werden. Dadurch ist der Intrinsic Cognitive Load relativ gering. Diese Lerninhalte können somit leichter verarbeitet und verstanden werden.

Nicht auf die Menge der zu verarbeitenden Informationen kommt es an, sondern auf die Anzahl der Sinneinheiten, die simultan im Arbeitsgedächtnis gehalten und verarbeitet werden müssen (vgl. Miller 1956; Sweller, van Merriënboër & Paas 1998). Diese Anzahl hängt vom Vorwissen ab und ist somit stark von individuumsinternen Bedingungen geprägt:

„Was für den in einem Wissensgebiet unerfahrenen Lernenden viele interagierende Sinneinheiten darstellt, ist für den erfahrenen Lerner vielleicht nur eine einzelne Einheit. Dieser Unterschied liegt mit daran, ob bereits Schemata vorhanden sind, mit denen Sinneinheiten zusammengefasst werden können, welche ansonsten einzeln interagieren würden“ (Rubitzko 2006, S. 74f).

Für Lernende ist demnach der Intrinsic Cognitive Load bei ein und demselben Lerninhalt unterschiedlich hoch. Letztlich lässt sich das Entstehen dieser kognitiven Belastung aus dem „Zusammenspiel des eigentlichen Lerninhaltes und der Expertise, die der Lernende in diesem Gebiet bereits erreicht hat“, erklären (vgl. ebd., S. 75).

Instruktionales Design von Lernangeboten kann somit den Intrinsic Cognitive Load nicht allein sondern nur in starker Abhängigkeit vom Vorwissen der Lernenden in der Weise beeinflussen, dass beispielsweise über Segmentierung und Sequenzierung des Lernmaterials die Element-Interaktivität für eine bestimmte Zielgruppe gesteuert wird (vgl. Niegemann 2008, S. 46; Sweller, van Merriënboër & Paas 1998).

Extraneous Cognitive Load

Der Extraneous Cognitive Load wird als nicht lernförderliche Belastung des Arbeitsgedächtnisses beschrieben, die durch das Design des Lernmaterials und die Organisation der Informationspräsentation bestimmt ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass dieselben Lerninhalte durch unterschiedliche Präsentationsarten ein unterschiedlich hohes Ausmaß kognitiver Belastung erzeugen.

„Extraneous load reflects the effort to process poorly designed instruction. When load can be reduced without changing the task, then the load is extrinsic” (Schnotz & Rasch 2008, S. 94).

„Müssen Lernende beim Durcharbeiten einer multimedialen Lerneinheit viele irrelevante, wenig zielführende und ineffektive kognitive Anstrengungen aufbringen, um die relevanten Informationen aus dem Lernmaterial zu extrahieren, ist der “Extraneous Cognitive Load“ hoch. Finden Lernende schnell die relevante Information, in leicht verständlicher Form, dann ist er gering. Mit “Extraneous Cognitive Load“ wird demnach jene Belastung des menschlichen Arbeitsgedächtnisses bezeichnet, die eine lernaufgabenirrelevante kognitive Anstrengung beim Lernenden verursacht. Dies ist der Fall, wenn die Begrenzung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses bei der Gestaltung der multimedialen Lernumgebung ignoriert wurde oder die Lernenden nicht optimal beim Aufbau und der Verknüpfung von Schemata unterstützt wurden“ (Niegemann 2008, S. 46).

Germane Cognitive Load

Mit dem Germane Cognitive Load werden die kognitiven Ressourcen bezeichnet, die noch neben dem Intrinsic und Extraneous Cognitive Load für den eigentlichen Wissenserwerbsprozess zur Schemakonstruktion und Schemaautomation im Arbeitsgedächtnis gebraucht werden (vgl. Sweller, van Merriënboër & Paas 1998).

„Diese [...] Quelle kognitiver Belastung umfasst alle Prozesse mentaler Repräsentation der zu lernenden Inhalte“ (Brünken & Leutner 2008, S. 557) und fokussiert somit den Prozess der Informationsverarbeitung selbst.

Im Gegensatz zu den beiden anderen kognitiven Belastungen „verbessert der “Germane Cognitive Load“ den Lernerfolg bzw. die Lernmotivation. Voraussetzung dafür ist, dass der “Intrinsic Cognitive Load“ gering ist und die Gestaltung der Lernumgebung einen geringen “Extraneous Cognitive Load“ beim Lernenden erwarten lässt. So können die im Arbeitsgedächtnis noch freien kognitiven Ressourcen zur Elaboration und Konstruktion von Schemata verstärkt für den Wissenserwerb genutzt werden“ (Niegemann 2008, S. 48f).

Sweller & Chandler (1994) sehen in der Schemakonstruktion und -automation eine Möglichkeit, das begrenzte Arbeitsgedächtnis zu entlasten und anstelle dessen das

Langzeitgedächtnis zu nutzen, da interagierende Sinneinheiten durch Schemata gemäß der Chunk-Bildung als komplexere Einheiten zusammengefasst und abgespeichert werden, wodurch der Intrinsic Cognitive Load reduziert wird (vgl. auch Rubitzko 2006, S. 75f).

Wie wirken diese unterschiedlichen Formen kognitiver Belastung zusammen?

Sweller (2005a) geht in der CLT von einem additiven Zusammenwirken dieser drei Quellen kognitiver Belastung aus. In einer spezifischen Lernsituation steht dieses Zusammenwirken jedoch in unterschiedlicher Beziehung zu der Effizienz eines Lernprozesses:

Erfolgreiches Lernen ist demnach davon abhängig, wie und in welchem Ausmaß das Arbeitsgedächtnis durch die einzelnen Anteile (Cognitive Loads) belastet wird. Bei bestehendem Intrinsic Cognitive Load sollte der Extraneous Cognitive Load möglichst gering gehalten werden, damit durch geeignete Instruktion genügend Germane Cognitive Load zur Schemakonstruktion und –automation zur Verfügung steht.

Müssen jedoch Lerninhalte mit nicht interagierenden Sinneinheiten verarbeitet werden, so ist der Intrinsic Cognitive Load relativ gering, da die einzelnen Sinneinheiten separat verarbeitet werden können und das Konstruieren von Zusammenhängen als zusätzliche Anstrengung entfällt. Die dadurch freien mentalen Ressourcen können durch ein höheres Maß an Extraneous Cognitive Load zusätzlich mitbelastet werden, weil noch genügend freie Kapazitäten zur Schemakonstruktion und -automation zur Verfügung stehen. Mit Blick auf den eigentlichen Lernprozess wird es in diesem Lernszenario daher als unwesentlich angesehen, dass das Arbeitsgedächtnis durch ein hohes Maß an Extraneous Cognitive Load belastet wird.

Demzufolge ist es insbesondere dann wichtig, den Extraneous Cognitive Load niedrig zu halten, wenn der Intrinsic Cognitive Load besonders hoch ist (vgl. auch Marcus, Cooper & Sweller 1996; Rubitzko 2006, Sweller & Chandler 1994).

Brünken & Leutner (2008) legen zusammenfassend dar: Intrinsic Cognitive Load wird als „notwendiger, aber instruktional nicht wirklich beeinflussbarer Anteil der kognitiven Belastung angesehen [...], [während] der extraneous load den Wissenserwerb negativ [beeinflusst], der germane load hingegen positiv. Lernen [...] findet nur dann statt, wenn einerseits das Ausmaß der kognitiven Gesamtanforderungen die gerade verfügbare kognitive Kapazität nicht übersteigt und wenn andererseits ein ausrei-

chendes Maß lernförderlicher (germane load induzierender) Prozesse ablaufen können. Das Ziel instruktionaler Gestaltung von Lehrsituationen allgemein und von medialen Lehrangeboten im Speziellen sollte daher sein, den extraneous load zu reduzieren und germane load zu fördern“ (ebd., S. 557f).

Nach Niegemann (2008, S. 49) lässt sich der Extraneous Cognitive Load durch Einsatz von Worked Examples, durch Ausnutzen des Modalitätseffektes und Beachten des Expertise Reversal Effects sowie durch das Vermeiden von Split Attention und Redundanzeffekten optimieren.

Der Worked Example Effect bezeichnet nach Renkl (2005) eine Form der Instruktion, die mit Hilfe von beispielbasiertem Lernen das Freisetzen von Arbeitsgedächtniskapazitäten für die Schemakonstruktion ermöglicht. Worked Examples eignen sich nach Reimann (1997) zur Schemavermittlung. Durch die vorgegebene Struktur erfährt der Lernende Orientierung im Lösungsprozess und wird durch diesen hindurch geleitet. Das unterstützt ihn beim Wissenserwerb und erleichtert zudem den Erwerb neuer Informationen (vgl. Chi, Glaser & Rees, 1983). Wissenserwerb wird hier im Sinne eines Fähigkeitserwerbs zur Schemadurchführung verstanden (“Vormachen – Nachmachen”), während Renkl (2002, 2005) insbesondere den Aspekt des Analysierens betont (“Vormachen – Analysieren – Selbermachen”): So können Worked Examples seiner Auffassung nach effektiver das Problemverständnis von Lernenden unterstützen als die direkte selbstständige Suche nach Problemlösungen.

Sweller & Chandler (1994) verweisen jedoch auch darauf, dass diese Effekte insgesamt nicht übergeneralisiert werden dürfen. Da es individuell sehr unterschiedlich ist, welche Schemata überhaupt in welchem Automationsgrad bei einem Lernenden vorliegen und eine Informationseinheit bilden, ist auch der Intrinsic Cognitive Load eines Lerninhalts individuell sehr verschieden, und so lassen sich einige Effekte nur bei Lerninhalten mit hoher Elementinteraktivität aufzeigen.

Individuelle Unterschiede beim Lernen mit Medien

In einer Vielzahl kognitionspsychologischer Studien wurde der Zusammenhang zwischen Lernereigenschaften und Lehrmaterialgestaltung beim Wissenserwerb untersucht. Im Mittelpunkt stand dabei die Frage, „ob alle Lerner gleichermaßen von multimedial präsentierte Information profitieren oder ob sich spezifische Lernervoraus-

setzungen identifizieren lassen, die für die Verarbeitung medialer Information von besonderer Bedeutung sind. [...] Insgesamt zeigen diese Studien, dass es einerseits kognitive Basiskompetenzen wie räumliches Vorstellungsvermögen oder verbale Fähigkeiten sind, die die Verarbeitung medial präsentierter Information erleichtern, andererseits Lernerpräferenzen für bestimmte Formen der Informationspräsentation eine Rolle zu spielen scheinen“ (Brünken & Leutner 2008, S. 559).

Das räumliche Vorstellungsvermögen spielt insbesondere bei der Verarbeitung bildhafter Informationen eine Rolle: „Hierzu vorliegende Untersuchungen (Brünken, Steinbacher & Leutner, 2000; Mayer & Sims, 1994) zeigen, dass Lerner mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen von bildlicher Informationsrepräsentation profitieren, wohingegen Lerner mit eher niedrigem räumlichen Vorstellungsvermögen deutliche Schwierigkeiten bei der Verarbeitung bildlicher Information haben“ (Brünken, Seufert & Leutner 2008, S. 308).

So resümiert bereits Mayer (2001, S. 179): „Design effects are stronger for low- rather than for high-knowledge learners and for high- rather than low-spatial learners.“

Als bei weitem bedeutendster Prädiktor individueller Unterschiede wird jedoch das domänenspezifische Vorwissen angesehen (vgl. Brünken & Leutner 2008, S. 559). „Während Experten nahezu unabhängig von der Güte medialer Informationspräsentation zu sein scheinen, erweist sich eine im Sinne kognitiver Prinzipien gute Lehrmaterialgestaltung für Novizen als besonders hilfreich“ (vgl. ebd., S. 559f).

„„Gute“ Lerner lernen auch mit „schlechten“ Systemen, unerfahrene Lerner hingegen profitieren stark von guter instruktionaler Gestaltung“ (Brünken, Seufert & Leutner 2008, S. 307f). Designeffekte wirken demnach bei Lernenden mit geringem domänenspezifischen Vorwissen mehr als bei Lernenden mit hohem Vorwissen, da diese aufgrund bereits gebildeter Schemata dazu imstande sind, instruktionale Mängel des Lernmaterials auszugleichen.

Dem Vorwissen scheint damit eine kompensatorische Funktion in Bezug auf die instruktionale Gestaltung des Lehrmaterials zuzukommen. Kalyuga, Ayres, Chandler & Sweller (2003) heben in diesem Zusammenhang insbesondere den Expertise Reversal Effect hervor, da sie mit ihren Forschungsbefunden sogar aufzeigen konnten,

„dass sich mediale Unterstützungsangebote, die für Novizen lernförderlich sind, als für Experten hinderlich erweisen können“ (vgl. ebd., S. 160).

Kalyuga (2005, S. 326ff; vgl. auch Kalyuga 2003, S. 333f) erklärt dieses Phänomen in folgender Weise: Mit zunehmendem Vorwissen des Lernenden verändert sich auch die relative Effektivität der Lernumgebung. Die eigentlich hilfreiche Gestaltung der Lernumgebung führt dann zu einer kognitiv hinderlichen Redundanz.

Lernende, die sich mit wenig domänenspezifischem Vorwissen einen neuen Lerngegenstand erarbeiten, müssen am Anfang des Lernprozesses neue Schemata konstruieren. Diese Konstruktions- und Schemaerwerbsprozesse können durch mediale Unterstützungsangebote gefördert werden. In diesem Sinne gewählte Instruktion – textuelle und bildhafte Darstellungen – kann zu diesem Zeitpunkt im Lernprozess erklärenden Charakter einnehmen und für den Lernenden von zentraler Bedeutung zum Verstehen des gesamten Sachverhalts und für die eigene Schemabildung sein.

Sind hingegen grundlegende Schemata einmal gebildet, so verlieren die zu ihrer Konstruktion bedeutungsvollen medialen Unterstützungsangebote ihre lernförderliche Funktion und erzeugen unnötige kognitive Belastung. Zeit und mentale Anstrengung sollten dann nicht durch Selektions- und Konstruktionsprozesse von Informationen verschwendet werden, vielmehr sollten die bereits existierenden Schemata für eine effektivere Bearbeitung genutzt werden können. Um den Expertise Reversal Effekt zu vermeiden, muss sich Instruktionsdesign demzufolge dem steigenden Niveau der Lerner anpassen ("learner adapted"). Das auf Bruner gründende Scaffolding bezeichnet eine aktuelle Forschungsrichtung, die sich mit diesem Zusammenhang auseinandersetzt: Anfangs unterstützende Hilfestellungen werden dem Lernenden nach und nach zur Effektivierung individuellen Lernens entzogen ("process of fading").

Auf dem Hintergrund der CLT interpretiert, lassen sich die Ergebnisse von Kalyuga, Ayres, Chandler und Sweller (2003) in folgender Weise zusammenfassen: „Mediale Unterstützungsangebote stellen für Novizen Quellen von *germane load* dar; sie fördern den Wissenserwerb, indem sie spezifische Verarbeitungsprozesse lenken. Experten bedürfen dieser Hilfen nicht, können die angebotenen Hilfen aber in der Regel nicht vollständig ignorieren. Dadurch werden diese für sie zu überflüssiger Information, die *extraneous load* hervorrufen und den Wissenserwerb reduzieren“ (vgl. Brünken & Leutner 2008, S. 560).

Welchen Nutzen hat die Cognitive Load Theory für mein Forschungsvorhaben?

Die Cognitive Load Theory eröffnet einen Rahmen zur Interpretation individueller Verhaltensweisen beim Lernen mit Animationen, wodurch sich der Einfluss von Animationen auf die Denk- und Vorstellungsentwicklung punktuell beschreiben lässt.

2.3 Lernen mit Animationen

Die Tatsache, dass im Jahr 2008 international das erste zusammenhängende Werk zur Forschung zum Lernen mit Animationen erschienen ist, verdeutlicht die Dringlichkeit und Aktualität dieser Thematik. Zur Einführung heißt es im Klappentext (Lowe & Schnotz 2008):

„This book presents the first comprehensive treatment of learning with educational animation. Based on research of internationally recognized experts, it aims to clarify and integrate the major themes of current research into learning with animation.”

2.3.1 Animation als Repräsentationsform

In einem ersten Zugang zu dem Begriff "Animation" (von lat. *animare*, "zum Leben erwecken", "beseelen") lassen sich sämtliche Techniken zusammenfassen, die durch das Anzeigen mehrerer Einzelbilder, welche sich nur in geringfügigen Details unterscheiden, beim Betrachter die Illusion einer (annähernd) kontinuierlichen Bewegung entstehen lassen. Die Einzelbilder können fotografiert, gezeichnet oder mit Hilfe des Computers erstellt sein.

Animationen lassen sich demnach als bildhafte Repräsentationsformen charakterisieren, die sich in ihrer grafischen Struktur dynamisch, d.h. (praktisch) kontinuierlich verändern (vgl. Girwidz, Rubitzko & Spannnagel 2004). Sie „zeichnen sich gegenüber anderen Instruktionsmedien dadurch aus, dass sie ihre Inhalte [...] dynamisch präsentieren“ (Schwan 2007, S. 101) und bieten die Möglichkeit, Prozesse modellhaft und in ihrem zeitlichen Ablauf darzustellen.

Schnotz, Seufert & Bannert (2001, S. 462) verstehen unter „Animationen Bilder, deren grafische Struktur sich während der Darbietung verändert, wobei es sich sowohl um eine eigendynamische Bildveränderung als auch um eine Beeinflussung der Bildstruktur durch den Lernenden von außen (z.B. durch eine Simulation) handeln kann.“

Neben Simulationen beinhaltet diese umfassende Definition von Animationen auch Filme. „Filme zeigen real aufgenommene Prozesse. Animationen hingegen bilden Vorgänge modellhaft ab. Der Übergang zwischen diesen beiden Repräsentationsformen ist jedoch fließend“ (vgl. Girwidz, Rubitzko & Spannnagel 2004, S.1).

Diese weit gefasste Definition wird der Darstellung aktueller Forschungsergebnisse zum Lernen mit Animationen zugrundegelegt.

Beim Lernen mit Animationen werden nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche Strukturen einbezogen (vgl. Schnotz, Seufert & Bannert 2001, S. 462). Nach Lowe (2003) lässt sich die graphische Darstellung eines Objektes diesbezüglich auf drei unterschiedliche Weisen verändern:

- (1) Mit *Transformationen* werden Veränderungen von Eigenschaften eines Objekts bezeichnet, beispielsweise Form-, Farb- oder Größenveränderungen.
- (2) Unter *Translationen* werden Positionsänderungen von Objekten verstanden.
- (3) *Transitionen* fokussieren die Flüchtigkeit der Darstellung: Objekte sind nur temporär sichtbar.

Animationen werden in zunehmendem Maße in multimedialen Lernumgebungen eingesetzt. Ihre Verwendung findet dabei jedoch vorwiegend intuitiv oder nach einfachen "Daumenregeln" statt, da „die Rolle dynamischer, animierter Grafiken bislang eher wenig erforscht [ist]“ (Brünken, Seufert & Leutner 2008, S. 305).

Schnotz & Lowe (2008) zeigen in diesem Zusammenhang den weiterhin bestehenden Forschungsbedarf auf: „Effective design and use of animations for learning cannot therefore be based on intuition or simple rules-of-thumb. Rather it requires a deeper understanding of how visual displays interact with the perceptual and cognitive system and how dynamic information can be most closely aligned with the requirements of the human information processing system“ (ebd., S.353).

2.3.2 Animationen und statische Bilder

Vergleichsstudien, die die Lernwirksamkeit von Animationen der von Bildern oder Bildsequenzen gegenüberstellen, kommen ebenso wie Metaanalysen zu uneinheitlichen Ergebnissen (vgl. Baxter & Preece 1999; Brünken & Leutner 2008; Christel 1994; Craig et al. 2002; Faber et al. 1991; Hegarty & Kriz 2008; Höffler & Leutner 2006; Krapp & Weidenmann 2001; Lewalter 2003; Marmolin 1991; Morrison, Tversky

& Bétrancourt 2000; Rieber 1991; Salomon 1994; Schnotz 2006a, 2008; Schnotz, Böckheler & Grzondziel 1999; Schnotz & Lowe 2008; Schnotz, Seufert & Bannert 2001; Weidenmann 2008). Im Folgenden soll ein Eindruck von der widersprüchlichen Befundlage vermittelt werden.

Warum Animationen eine *höhere* Lernwirksamkeit zukomme:

Das visuelle System des Menschen sei durch seine evolutionsbiologische Genese eher an die Aufnahme von bewegten Bildern als die von statischen Bildern angepasst (vgl. Marmolin 1991). Das Symbolsystem von Animationen, Filmen und Videos komme der alltäglichen Wahrnehmung am nächsten und es erfordere von seinen Betrachtern eine geringere visual literacy als das Lernen mit statischen Bildern (vgl. Krapp & Weidenmann 2001, S. 443).

Animationen haben eine unterstützende Funktion in Lern- und Verstehensprozessen - insbesondere bei Lerninhalten, bei denen das räumliche Vorstellungsvermögen einen entscheidenden Einfluss auf das Verständnis hat (Baxter & Preece 1999). Sie veranschaulichen durch die Demonstration von Handlungsabläufen unmittelbar die Dynamik des Sachverhalts und ermöglichen eine visuelle Unterstützung der mentalen Simulation von Prozessen. Dadurch eignen sie sich insbesondere für die Ausbildung dynamischer mentaler Modelle (Salomon 1994; Weidenmann 2008).

Animationen steigern besonders die Lernleistung und die Lernwirksamkeit (vgl. Craig et al. 2002; Christel 1994; Lewalter 2003; Höffler & Leutner 2006) und die Lernenden erwerben ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge (vgl. Lewalter 2003, S. 34f).

Diese Befundlagen relativierend wird hervorgehoben, dass Animationen nur dann zu höheren Lernleistungen führen, wenn durch instruktionale Maßnahmen die Aufmerksamkeit des Lernenden auf die wesentlichen Merkmale des Lerninhalts gelenkt wird (Rieber 1991), dass in den Fällen, wo der Einsatz von Animationen zu höherem Lernerfolg führte, diese häufig mehr Informationen beinhalteten als die statischen Bilder (Morrison, Tversky & Bétrancourt 2000) und dass Vorteile von Animationen häufig nur bei komplexen Lerninhalten erkennbar sind (Faber et al. 1991). Bei einfacheren Lerninhalten sei das Studium der Animationen zwar deutlich einfacher als bei statischen Bildern, es zeigen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede im Lernerfolg oder in der Lerneffizienz.

Hegarty & Kriz (2008) untersuchten Novizen mit wenig unterschiedlichem Vorwissen im Hinblick auf „Effects of Knowledge and Spatial Ability on Learning from Animation“ und konnten keinerlei Effekte feststellen: “Perhaps the most striking result of this review is that in 20 comparisons across eight experiments, there was no evidence for any interaction between ability or knowledge and the type of instruction [...]. [There] is no evidence in any of these studies that animations or static diagrams are more or less effective for individuals with different abilities or knowledge, or that different types of animations are more or less effective for different individuals” (ebd., S. 25).

Warum Animationen eine *geringere* Lernwirksamkeit zukomme:

„Animationen [erweisen sich] mitunter als eher hinderlich, obgleich sie häufig zumindest den Anschein hoher Wirklichkeitsnähe aufweisen und als besonders attraktive Formen der Darstellung betrachtet werden. [...] [Animationen] erweisen sich nur unter sehr spezifischen Bedingungen als wirksam, häufig sind sie eher störend und behindern den Lernprozess“ (Brünken & Leutner 2008, S. 556f).

Das Lernen mit Animationen führe eher zu Fehlkonzepten als das Lernen mit statischen Bildern oder Texten (Rieber 1991). Animationen ziehen zwar mehr Aufmerksamkeit auf sich, wenn jedoch mentale Simulationen zur Aufgabenbearbeitung erforderlich waren, „schnitten die Lernenden mit Animationen schlechter ab als die mit statischen Bildern“ (Schnotz, Seufert & Bannert 2001, S. 463)

So resümiert Schnotz (2006a, S. 172): „Die verbreitete Annahme, ein dynamischer Gegenstand sollte grundsätzlich möglichst naturalistisch per Animation in seiner Dynamik gezeigt werden, ist nicht haltbar. Animationen können die Aufmerksamkeit des Lernenden auf Wichtiges (und ebenso auf Unwichtiges) lenken.“

Darüber hinausgehend betonen Schnotz & Lowe (2008), dass sich statische Bilder ebenso gut zur Konstruktion eines dynamischen mentalen Modells eignen: „[...] our analysis has shown that it is not necessary for the dynamic character of the depiction to match the dynamic nature of the subject matter it represents. In fact, it is quite common to construct dynamic mental models from static pictures because we often cannot help making dynamic inferences on the basis of a static picture” (ebd., S. 348). Schnotz & Lowe argumentieren hier – mit gewöhnlichen alltäglichen Anforderungen an den Menschen, aus statischen Situationen ein dynamisches mentales Modell zu konstruieren – letztlich evolutionsbiologisch.

Der Vergleich dieser Argumentationsweise mit der eingangs dargestellten von Weidenmann (2008, S. 154), nach der sich Animationen zur Bildung eines dynamischen mentalen Modells deutlich besser eignen als statische Bilder, zeigt, dass dieselbe evolutionsbiologische Sicht- und Argumentationsweise sehr unterschiedlich interpretiert wird. Insgesamt stehen sich damit zwei nachvollziehbare Argumentationsweisen für deutlich unterschiedliche Auffassungen gegenüber und es scheint, dass sich die Kontroverse bei der Forschung zum Lernen mit statischen Bildern und Animationen auf die Frage reduzieren lässt, aus welcher Interpretation sich die eleganteste evolutionsbiologische Erklärung für welche spezifische Auffassung bzw. Befundlage ergibt.

Letztlich verdeutlicht diese widersprüchliche Befundlage, dass generelle Medienvergleiche und Aussagen zum Lernen mit statischen Bildern im Vergleich zu Animationen mit Schwierigkeiten verbunden, wenn nicht gar unmöglich sind (siehe auch die bereits dargelegte grundsätzliche Kritik von Kerres, 2001).

Schnotz & Lowe (2008) plädieren schließlich für eine vereinheitlichte Sichtweise:

“Our analysis suggests that it is very difficult to justify a sharp distinction between animation and static pictures from a psychological point of view. [...]. Both kinds of depictions are processed by the same perceptual and cognitive system according to the same set of perceptual and cognitive principles” (ebd., S. 348).

Als Konsequenz sollte kognitionspsychologische Forschung nicht mehr die unspezifische Frage stellen, ob es besser ist mit Animationen oder mit statischen Bildern zu lernen. Vielmehr sollte sie sich auf die wesentlichen Kernfragen individuumsinterner Verarbeitungsprozesse beim Lernen mit bildhaften Repräsentationen konzentrieren, um Konsequenzen für Lehr- Lern-Prozesse und die instruktionale Gestaltung von Lernmaterialien ziehen zu können (vgl. ebd., S. 348).

2.3.3 Funktionen von Animationen

Animationen sollen Inhalte verständlicher machen, indem sie deren Struktur und Strukturelemente in die Zeit der Aufmerksamkeit des Lernenden – und damit in die Zeit seiner sukzessiven Rezeption – abbilden (vgl. Meder 2006, S. 182). Dadurch, dass sie die Möglichkeit bieten, Prozesse sowohl zeitgebunden als auch modellhaft darzustellen, liefern sie „die Kombination von Realitätstreue und didaktischer Reduktion, die einen Lernprozess optimieren kann“ (vgl. ebd., S. 190).

Nach Schnotz, Seufert & Bannert (2001) können Animationen verschiedene didaktische Funktionen zugeschrieben werden: Die „Funktion der Dekoration, der Motivation, der Aufmerksamkeitssteuerung und die Funktion der Darstellung, häufig in Verbindung mit der Funktion der Supplantation oder der Exploration“ (ebd., S. 462). Neben den dekorativen und motivationalen Aspekten lassen sich insbesondere die Funktion der Aufmerksamkeitssteuerung und die Funktion der Darstellung als zentrale Funktionen von Animationen charakterisieren.

Animierte Bilder können zur Aufmerksamkeitssteuerung des Lernenden verwendet werden, indem durch Bewegungen innerhalb eines Bildes der Fokus des Lernenden auf relevante Stellen des Lerngegenstandes gelenkt wird.

Die Darstellungsfunktion von Animationen wird in der expliziten Abbildung und Darstellung dynamischer Informationen gesehen (vgl. Baxter & Preece 1999; Lowe 2003; Schnotz & Rasch 2008). In statischen Bildern sind dynamische Informationen hingegen nur implizit oder gar nicht enthalten.

Die Supplantationsfunktion und die Explorationsfunktion lassen sich als spezifische Darstellungsfunktionen charakterisieren: „Die Supplantationsfunktion besteht darin, dass ein vom Lernenden noch nicht selbständig vollziehbarer mentaler Prozess mit externer Unterstützung durch eine Animation nachvollzogen wird. Die Explorationsfunktion besteht darin, dass der Lernende einen Gegenstand mit Hilfe einer interaktiven Animation zu Untersuchungszwecken manipuliert und analysiert“ (Schnotz, Seufert & Bannert 2001, S. 462f).

Im Zusammenhang mit unterschiedlichen Lernvoraussetzungen kommen diesen spezifischen Darstellungsfunktionen zwei verständnisunterstützende Funktionen zu:

„[...] Animation can have two basic functions in supporting comprehension and learning, depending on the learner's level of expertise in the corresponding knowledge domain: an enabling function and a facilitating function“ (Schnotz & Rasch 2008, S. 92).

„The enabling function means that due to a reduction of cognitive load, processes become possible which otherwise would have remained impossible. The facilitating function means that due to a reduction of cognitive load, processes that were already possible but only with a great deal of mental effort, become possible with less effort“ (ebd., S. 94).

Beide Funktionen, die "Anregungsfunktion" und die "Erleichterungsfunktion", resultieren aus einer Reduktion des Cognitive Load (Mayer 2001; Sweller, van Merriënboer & Paas 1998; Sweller & Chandler 1994).

Schnotz & Rasch (2008) konnten zeigen, dass

- die *enabling function* bei Lernenden mit hohen Lernvoraussetzungen (hohe kognitive Fähigkeiten und hohes Vorwissen) stärker ausgeprägt ist als bei Lernenden mit niedrigen Lernvoraussetzungen, da diese Lerner eher in der Lage sind, die Möglichkeiten der Animationen extensiver zu nutzen, als Individuen mit weniger Lernvoraussetzungen.
- die *facilitating function* bei Lernenden mit niedrigen Lernvoraussetzungen stärker ausgeprägt ist, da diese Individuen mehr externe Unterstützung benötigen, als Lernende mit hohen Voraussetzungen (vgl. ebd. S. 96f).

Dies legt nahe, „[that] animations appear capable of having different effects for different tasks“ (ebd., S. 100). In einer Folgeuntersuchung zeigen Schnotz & Rasch, dass *verschiedenen Arten von Animationen* bei unterschiedlichen Lernvoraussetzungen unterschiedlich-spezifische Funktionen in Lernprozessen zukommen können:

„Different kinds of animated pictures seem to fulfill different functions for learning. Animations can be used to generate and display a larger number of static pictures and show different states or show a subject matter from different perspectives. Such animations [“Manipulation pictures” and “Stepwise simulation pictures”] seem to have primarily an enabling function. They enable a learner to perform more cognitive processing than s/he would be able to with static pictures [und es hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass durch die zusätzlichen Informationen dieser Animationen neben einer umfangreicheren auch eine tiefere kognitive Verarbeitung der Inhalte angeregt werden konnte]. On the contrary, animations allowing the display of dynamic processes seem to have primarily a facilitating function. These animations can provide external support for corresponding mental simulations and, thus, make these mental processes easier to perform. Individuals with high learning prerequisites seem to benefit primarily from the enabling function, whereas individuals with low learning prerequisites seem to be affected primarily by the facilitating function of animations. [...] The facilitating function of animations can be helpful for learners with very low

learning prerequisites who would not be able to perform the corresponding mental simulations on their own" (ebd., S. 111).

Durch die explizite Darstellung von dynamischen Beziehungen zwischen den in einer Animation enthaltenen Elementen helfen kontinuierliche Animationen diesen Lernenden, überhaupt erst einmal eine Vorstellung eines Prozesses aufzubauen und können damit die Konstruktion dynamischer mentaler Modelle unterstützen.

2.3.4 Probleme beim Einsatz von Animationen und Gestaltungsrichtlinien

Probleme beim Einsatz von Animationen treten insbesondere dann auf, wenn Animationen ihre zentralen Funktionen ("Aufmerksamkeitssteuerung" und "Darstellung") lernerspezifisch "nicht ausreichend oder zu gut" erfüllen und es dadurch zu Passungsproblemen zwischen Individuum und Medium kommt. Hierdurch entstehen sehr unterschiedliche Arten von Cognitive (Over-) Load Problemen. In einem direkten Bezug hierzu werden auch die Aspekte "Flüchtigkeit animierter Darstellung", "Benutzerkontrolle" und "Verarbeitungstiefe" als wesentlich erachtet.

Erkenntnisse aus dem Einsatz von Animationen und dabei auftretenden Problemen liefern der Kognitionspsychologie die (Forschungs-) Grundlage zur Formulierung und weiteren Verfeinerung von Gestaltungsprinzipien.

Der übergeordnete Zusammenhang zwischen (Problemen bei) dem Einsatz von Animationen ("external and internal learning activities") und der Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien ("design of external representations") lässt sich als Blick auf die beiden Seiten ein und derselben Münze charakterisieren (vgl. Plötzner, Bodemer & Neudert 2008, S. 88), weshalb beide Aspekte unter diesem Kapitel subsummiert werden.

Mit der Funktion der Aufmerksamkeitssteuerung wird beabsichtigt, den Fokus der Lernenden auf relevante Stellen des Lerngegenstandes zu lenken und den Extraneous Cognitive Load zu reduzieren (vgl. Kirby 2008, S. 176). Es besteht jedoch auch die Gefahr, dass der Aufmerksamkeitsfokus auf unwichtige Aspekte gelenkt wird (vgl. Schnotz & Rasch 2008, S. 92). Dies kann zu höheren kognitiven Belastungen führen, weil zusätzliche Verarbeitungsanforderungen – insbesondere die Selektion relevanter Informationen – an die Lernenden gestellt werden (vgl. Kirby 2008; Lowe 2003; Park & Hopkins 1993; Yeo et al. 2004).

„One of the key [...] is that attention is limited. It is very difficult to pay attention to more than one task at a time. Our only hopes in a complex world are to automate some tasks so that they can operate in the background, without absorbing the limited resource of conscious awareness, and to maintain focus as much as possible.[...] Good teaching manages learners' attention, and teaches learners how to manage their own [...]. Animated learning materials have great potential power with respect to attention. Motion is inherently attention-grabbing (or at least this is an inherent characteristic of our visual system), and the other tricks that designers employ (lightning, typographical, and graphical cues) are all intended to make one look. If where we look is where we *should* look, and if we know what to do with what we see, animation is supporting and perhaps enhancing learning. Naive learners will not necessarily inspect the critical aspects of the display [...]. [Where] media designers get us to look is not necessarily where a thoughtful instructor would want us to look. What is entertaining is not necessarily productive” (Kirby 2008, S. 175).

Plötzner, Bodemer & Neudert (2008) untersuchten den „successful and less successful use of dynamic visualizations”. In ihrer Studie fanden sie heraus, dass “less successful learners did not spend less time on processing the dynamic visualizations than successful learners did. In contrast, less successful learners spent a considerably larger amount of time making use of the visualizations than the successful learners did. [...]. The observations [...] indicate that the less successful learners were not willing to invest the same amount of mental effort [...] during problem solving as the successful learners. Whereas the successful learners made use of the dynamic visualizations in a very structured and goal-oriented way, the less successful learners employed them with only little understanding of what the visualizations represent” (ebd., S.87f). Daraus schließen auch sie, dass „[less successful learners] possibly need to learn how to identify and analyze the relevant components of dynamic visualizations. Less successful learners might also need to learn how to relate the information presented in dynamic visualizations to other sources of information such as instructional texts” (ebd., S. 88).

Zur Vermeidung dieser generellen Schwierigkeit, inhaltlich relevante Informationen zu selektieren, verweist Lowe (1998) im Hinblick auf die Gestaltung von Animationen auf den Anspruch des In-Beziehung-Setzens von Inhalt und Form einer Animation. Demgemäß sollten möglichst nur inhaltsrelevante Informationen dargestellt werden,

so dass diese leicht entnommen werden können und dadurch die Inferenz irrelevanter Informationen vermieden wird ("*Spatial and Temporal contiguity principle*").

Außerdem besteht die Gefahr, dass die Aufmerksamkeit nicht gleichzeitig auf alle Elemente der Animation fokussiert werden kann. Dieser als Split-Attention bezeichnete Effekt wird dadurch erklärt, dass die Aufmerksamkeitszuwendung auf einen bestimmten Teil der Animation zu einer Vernachlässigung eines anderen Teils führt (vgl. Lowe 2003). Diesbezüglich können aufmerksamsfokussierende und -steuernde Maßnahmen gemäß dem *Signaling-Prinzip* („cues“ – explizite visuelle Hinweise: Pfeile, sprachliche Erläuterungen, Stichworte) unterstützend wirken (vgl. Girwidz, Rubitzko & Spannagel 2004).

Ein sehr zentraler Aspekt im Zusammenhang von Aufmerksamkeit und zusätzlicher kognitiver Belastung ist die Flüchtigkeit animierter Darstellung:

Während des Ablaufs einer Animation können einzelne Animationsabschnitte nur zeitlich begrenzt betrachtet werden. Dadurch müssen Lernende ihren Aufmerksamkeitsfokus zur richtigen Zeit am richtigen Ort haben, relevante Informationen aus unterschiedlichen Abschnitten identifizieren, im Arbeitsgedächtnis aktiv halten (bzw. aus dem Langzeitgedächtnis aktivieren) und diese miteinander in Beziehung setzen. Die Flüchtigkeit animierter Darstellung erfordert dadurch zusätzliche kognitive Anforderungen, schränkt die Möglichkeiten der Analyse ein und führt oftmals zu einem erhöhten Maß an darauf verwendeter Lernzeit (vgl. Schnotz & Lowe 2008, S. 349f; Morrison, Tversky & Betrancourt 2000).

Dem Problem eingeschränkter Analysemöglichkeiten lässt sich entgegenwirken, indem „der Lernende eine Animation schrittweise oder mit verschiedener Geschwindigkeit ablaufen lassen oder an beliebiger Stelle anhalten kann (vgl. Mayer & Chandler, 2001)“ (Schnotz 2006a, S. 170).

Allerdings birgt die Option der Benutzerkontrolle zusätzliche Probleme. Zwar reduziert sie den Komplexitätsgrad und macht Animationen dadurch besser handhabbar (vgl. Lowe 2008), Untersuchungsergebnisse weisen jedoch häufig auf eine mangelnde Passung zwischen individuellen Vorkenntnissen und den Explorationsmöglichkeiten durch die Benutzersteuerung hin. Im Einzelnen wird belegt, dass

- der Aspekt der Benutzerkontrolle zusätzliche kognitive Anforderungen an die Lernenden stellt und Auslöser kognitiver Überlastung sein kann (Kirby 2008, S. 172; Boucheix 2008, S. 230; Schnotz & Lowe 2008),
- die Fähigkeiten zur benutzergesteuerten Exploration der Möglichkeiten bei den Lernenden vorhanden sein müssen (Schnotz & Lowe 2008)
- und ein hoher Grad an Benutzerkontrolle ohne zusätzliche äußere Unterstützung insbesondere Lernende mit geringem Raumvorstellungsvermögen sowie Novizen überfordert und ihr Verständnis der Lerninhalte mindern, zu Missinterpretationen und zur Konstruktion ungeeigneter dynamischer mentaler Modelle führen kann (Boucheix 2008, S. 230; Lowe 2008, S. 67). Für diese Lernenden erweisen sich ebenfalls aufmerksamkeits-fokussierende und -steuernde Maßnahmen gemäß dem *Signaling-Prinzip* zur Unterstützung und Orientierung für den eigenen Lern- und Verstehensprozess als besonders geeignet (vgl. Boucheix 2008., S. 231).

Übergreifend betonen Schnotz & Lowe (2008), dass die Art und Weise der Benutzersteuerung auf die individuell-internen Bedingungen des Lernenden abgestimmt sein muss. Sie schlagen vor, nur eine begrenzte Anzahl an Möglichkeiten zur Benutzersteuerung einzurichten, dem Kenntnisstand des Lernenden "angepasst" („learner-adapted-control“) (vgl. ebd., S. 352).

Für die instruktionale Gestaltung benutzergesteuerter Animationen fordern sie insgesamt die Berücksichtigung einer Balance zwischen freien Explorationsmöglichkeiten, individuellen Lernereigenschaften ("Vorkenntnisse", "Arbeitsgedächtniskapazität") und dem Bereitstellen äußerer Unterstützung (vgl. ebd., S. 352).

Boucheix (2008) hebt im Zusammenhang mit dieser Balance den Aspekt der unterschiedlich spezifischen Aufgabenanforderungen von Animationen hervor. Sein aufgezeigtes Spektrum lässt sich als Matrix aus Aufgabenanforderungen und Maß an Benutzersteuerung interpretieren: Je komplexer die Animation, desto ungeeigneter ein hoher Grad an Benutzersteuerung. „[A] balanced view of the potential of user control for assisting learning requires that animations with two kinds of task goals should be distinguished: (i) animations intended to support a deep understanding of conceptual changes or mechanisms and (ii) animation to support learning by doing of procedural tasks“ (ebd., S. 230).

Die Gestaltung von Benutzerkontrolle muss sich demnach an den Aufgabenanforderungen und den damit verbundenen Lernzielen orientieren. Freie Benutzerkontrolle in Animationen, bei denen tiefes Verständnis für komplexe dynamische Prozesse erforderlich ist, erweist sich einer Vielzahl von Untersuchungen zufolge (vgl. bspw. Rebetz et al. 2004; Lowe 2005) als wenig lernförderlich (vgl. Boucheix 2008, S. 231).

Hingegen eignet sich ein hohes Maß an Benutzerkontrolle insbesondere dann, wenn dadurch das "learning by doing" und das Verständnis schrittweiser Lernaufgaben unterstützt wird, wie bspw. beim Imitations-Lernen ("Vormachen-Beobachten/ Analysieren-Nachmachen-Analysieren/Kontrollieren-Wiederholen"). Bei derartigen Aufgaben ermöglicht die Benutzerkontrolle lernerangepasste Explorationen dadurch, dass Informationen genau dann abgerufen werden können, wenn sie für den eigenen Lernfortschritt benötigt werden: Einzelne Teilschritte können analysiert, konkret handelnd bzw. mental vollzogen oder in beiden Weisen imitiert und bei Bedarf wiederholt werden (vgl. auch ebd., S. 230f). Der jeweilige Lernerfolg kann nach einzelnen Teilschritten überprüft werden, indem das Produkt der eigenen Handlung bzw. das Produkt der mentalen Operation mit dem animiert dargestellten (Teil-) Ergebnis verglichen wird. Dem animierten Ergebnis jedes Teilschrittes kommt somit eine Orientierungsfunktion für den jeweils bevorstehenden Teilschritt zu. Hierdurch werden der Benutzerkontrolle in derartigen Animationen Funktionen zugeschrieben, die in Analogie zu Aspekten des "Imitations-Lernens von Geburt an" betrachtet werden können und sich an den Möglichkeiten einer sehr eingeschränkten Interaktion zwischen Lernendem und Erziehungs- oder Lehrperson in Lehr- Lernsituationen anlehnen. Damit kann der Animations-Begriff außerhalb des Rahmens bildschirmbezogener Darstellung weiter gefasst werden.

Insgesamt kann ein gewisses Maß an Benutzerkontrolle der Flüchtigkeit animierter Darstellungen und dem damit verbundenen Problem der eingeschränkten Analysemöglichkeiten entgegenwirken.

Mit dem Merkmal der Flüchtigkeit verbindet sich außerdem die Gefahr einer weniger tiefen Verarbeitung des dargestellten Lerninhalts:

Nach Craik & Lockhardt (1972) hängt erfolgreicher Wissenserwerb von der Tiefe der Verarbeitung von Informationen ab. Zur Klärung der Frage, wie Verarbeitungstiefe charakterisiert werden kann, unterscheiden sie verschiedene Ebenen, auf denen per-

zeptuelle Stimuli verarbeitet werden. Auf den oberen Ebenen werden ihrer Ansicht nach sensorische oder physikalische Merkmale analysiert, auf den tieferen Ebenen finden strukturelle und semantische Analysen statt (vgl. ebd., S. 675). Oberflächliche Verarbeitung kennzeichnet sich demnach durch einen Mangel an strukturellen und semantischen Analysen.

Kirby (2008) differenziert Verarbeitungstiefe mit Hilfe der Merkmale "Tiefe" und "Oberfläche". Er betont, dass sich individuelle Lernkonzeptionen durch diese beiden – jeweils in unterschiedlichen Anteilen zusammengesetzten – Merkmale charakterisieren lassen: „[...] one being the cognitive structures that are or have been assembled (i.e., long-term memory schemas, mental models, situation models, etc.), and the other being the learners' orientation or approach to such learning. [...] I would summarize them as portraying learning conceptions in two dimensions, deep and surface. The more one demonstrates allegiance to the deep approach, the more one relates information, seeks meaning, and is intrinsically motivated by learning. The more one follows the surface approach, the more likely one is to fragment learning, rely upon memorization, and be extrinsically motivated. These two characteristics, deep and surface, mix in different proportions to form individual learners' conceptions of learning” (ebd., S. 174).

Vor allem stellt Kirby aber heraus, dass es der Kognitionspsychologie bisher nicht gelungen ist, Verarbeitungstiefe mit Hilfe der gängigen Modalitätsmodelle zur Informationsverarbeitung angemessen zu beschreiben (vgl. ebd., S. 169). Die Komplexität dessen, was Verarbeitungstiefe in unterschiedlichen Lernsituationen bedeuten kann, reicht von dem Abstrahieren (mit dem Absehen von Details) über das Analysieren (mit dem Beibehalten der Details) bis hin zum Bilden von Erweiterungen (mit dem Erhöhen von Details), bei dem das In-Beziehung-Setzen zu anderen Lerngegenständen und Wissens-elementen vorgenommen wird (vgl. ebd., S. 170).

Darüber hinaus bestehen Schwierigkeiten aufgrund der tatsächlichen Verhaltensweisen von Lernenden in alltäglichen Lernsituationen. Lernende seien oftmals nicht gewillt, in aufwändige kognitive Verarbeitung zu investieren, selbst wenn sie davon überzeugt seien, dass sie dadurch mehr und tiefer lernen könnten, und es das Beste für ihr Lernen wäre (vgl. ebd., S. 171).

„Depth is an important goal of instruction, but effort is required. It is possible that excellent animations or other graphics make learning too easy, for some learners or in some situations. Though too much challenge may decrease engagement and learning, too little challenge may also decrease learning” (ebd., S. 174). [...] The same instructional instance will affect learners of different working memory capacity differently. [...] less able learners may benefit from reduced cognitive load or guidance [...] [but] there is great danger that the animations that are intended to assist the less able learners (those in greatest need of help) may be detrimental to their learning. This will happen if the animations encourage attention to the less important content, or if they place too much load (extraneous, but perhaps also germane) on working memory, or if the graphic displays call for more knowledge than the learners have, or require more effort than they are willing to invest. [...] Simplified instruction may harm learning [too]. There is the danger that animations or other ‘user-friendly’ interventions, will remove the challenge that had encouraged the learners to exert more effort and thus process information more deeply” (ebd., S. 176).

Kirby verdeutlicht hier letztlich das Problem der mangelnden lernerspezifischen Passung. Animationen können dadurch in unterschiedlicher Weise Auslöser von geringer Verarbeitungstiefe sein, indem sie entweder zu hohe oder aber zu niedrige kognitive Anforderungen an die Lernenden stellen.

„Animated pictures can obviously hinder knowledge acquisition, because they sometimes reduce the demands on the learner’s cognitive processing in an unwelcome way“ (Schnotz 2001, S. 29). Krapp & Weidenmann (2001) sehen den zentralen Verursacher in der direkten Art der Darstellung: Das Betrachten von Animationen kann durch die Intuitivität und Eingänglichkeit der direkten Darstellung zu einer geringen Verarbeitungstiefe führen. Da Abläufe und Zusammenhänge durch die Animation visualisiert werden und nicht mental simuliert werden *müssen*, können Lernende von der Konstruktion eines dynamischen mentalen Modells abgehalten werden (vgl. ebd., S. 443f).

Hiermit verbindet sich der "negative Supplantationseffekt", bzw. in der detaillierteren Bezeichnung von Schnotz (2002) der „negative facilitating effect“, der sich auch als Hemmungsfunktion von Animationen charakterisieren lässt: „If individuals are perfectly capable of performing [...] mental simulations by themselves, external support

can lead to a decrease in productive processing. Accordingly, students invest less cognitive effort in learning from animation than when learning from static pictures” (Schnotz & Rasch 2008, S. 97f). Animationen bieten diesen Lernenden eine Unterstützung, die sie gar nicht benötigen. Statt einen mentalen Simulationsprozess aktiv und selbstständig durchzuführen, können sie den äußeren Prozess passiv mitvollziehen und dadurch ungewollt am Vollzug lernrelevanter mentaler Prozesse gehindert werden (vgl. auch Schnotz 2006a, S. 170).

Bei diesen Lernenden führt die *facilitating function* von Animationen zu einer unnötigen Reduktion des Germane Cognitive Load – assoziiert mit dem Verlust an Verarbeitungstiefe und an dem Vollzug lernrelevanter mentaler Prozesse – wodurch die zur Verarbeitung und mentalen Integration der Information notwendige produktive Belastung des Arbeitsgedächtnisses gar nicht erst erreicht wird (vgl. auch Girwidz, Rubitzko & Spannnagel 2004).

Mit Blick auf die Wirkweise von Animationen und die Anforderungen an einen adäquaten Einsatz in Lehr- Lernsituationen lässt sich gemäß Schnotz & Rasch (2008) zusammenfassen: „[The] use of animation in multimedia learning environment seems to be beneficial only under some circumstances, whereas it can have negative effects under other circumstances. Adequate use of animation will only be possible in the basis of a sufficient understanding of the interplay between animated displays and the functioning of the learner’s perceptual and cognitive system” (ebd., S. 112).

Innerhalb dieses Zusammenspiels wende ich nun den Blick auf die andere Seite der Münze, und damit auf die (Entwicklung von) Gestaltungsrichtlinien für Animationen:

„Because animations and static pictures have far more in common than is generally supposed, we can suggest that instructional design principles found to be successful with static pictures could also be applied to animations. [...]. Generally speaking, our integrated approach suggests that fundamental principles for designing educational animations should have much in common with principles for designing static educational pictures” (Schnotz & Lowe 2008, S. 348ff).

Mayer (2008) bezieht die "allgemeinen Gestaltungsprinzipien multimedialen Lernens" speziell auf das Lernen mit Animationen. Unter der Perspektive der Cognitive Load Theory unterscheidet er drei Ebenen kognitiver Verarbeitungsprozesse:

Type of Processing	Definition	Cognitive Processes	Cognitive Load Theory
Extraneous Processing	Cognitive processing that is not related to the objective of the lesson.	None	Extraneous Load
Essential Processing	Initial cognitive processing that is relevant to the objective of the lesson.	Selecting & some organizing	Intrinsic Load
Generative Processing	Deep cognitive processing that is relevant to the objective of the lesson.	Organizing & integrating	Germane Load

Abbildung 8: „Three Processing Demands on Cognitive Capacity” (Mayer 2008, S. 36), ergänzt mit Bezügen zur Cognitive Load Theory.

Auf Basis dieser Unterscheidung formuliert er die "allgemeinen Gestaltungsprinzipien für multimediales Lernen" speziell für das Lernen mit Animationen (s. Abbildung 9):

„Overall, the 10 principles [...] help to shape a cognitive theory of multimedia learning that focuses specifically on animation (Mayer 2001, 2005). Each principle is based on an experimental test of a prediction of the theory concerning how to reduce extraneous processing, manage essential processing, or promote generative processing. Sweller (1999, 2005a; Paas, Renkl & Sweller, 2003) refers to these as extraneous load, intrinsic load, and germane load, respectively” (Mayer 2008, S. 45).

Reducing Extraneous Overload [CLT: Extraneous Cognitive Load]

Coherence principle: People learn better when extraneous animation or narration elements are excluded rather than included.

Signaling principle: People learn better when cues are added than highlight the organization of the animation or narration.

Redundancy principle: People learn better from animation and narration than from animation, narration, and on-screen text.

Spatial contiguity principle: People learn better when corresponding elements of the animation and on-screen text are presented near rather than far from each other on the screen.

Temporal contiguity principle: People learn better when corresponding animation and narration are presented simultaneously rather than successively.

Managing Essential Overload [CLT: Intrinsic Cognitive Load]

Segmenting principle: People learn better when a narrated animation is presented in learner-paced segments than as a continuous unit.

Pre-training principle: People learn better from a narrated animation when they have had training in the names and characteristics of the main concepts.

Modality principle: People learn better from animation and narration than from animation and on-screen text.

Fostering Generative Processing [CLT: Germane Cognitive Load]

Personalizing principle: People learn better when a narration is in conversational style rather than formal style.

Voice principle: People learn better when the narration is spoken in a standard-accented human voice than a machine voice or accented human voice.

Abbildung 9: „Ten Ways to Overcome Challenges to Learning with Animation” (Mayer 2008, S. 37)

Diese zehn forschungsbasierten Prinzipien bilden nach Mayer den Ausgangspunkt weiterer Forschungsentwicklungen zur instruktionalen Gestaltung von Animationen: „[...] there is a growing research base capable of supporting evidence-based practice – that is, evidence-based practice involves basing instructional design decisions on empirical research and research-based theory rather than on the opinions of experts. The 10 research-based principles [...] provide a modest starting point for the evolution of evidence-based practice in multimedia design” (ebd., S. 45).

Schnotz & Lowe (2008) heben außerdem das Minimalismus-Prinzip hervor. Sie sehen darin eine geeignete Möglichkeit, Lernenden zu helfen, ihre Aufmerksamkeit auf die relevanten Merkmale eines Lerngegenstandes zu richten. Animationen müssen demnach nicht möglichst realitätsnah sein und alle dynamischen Details beinhalten. Sie sollten selektiv sein und auf zeitliche Details verzichten, die nicht zur Konstruktion eines adäquaten dynamischen mentalen Modells notwendig sind (vgl. ebd., S. 351).

Auch die Bestrebungen von Morrison, Tversky & Betrancourt (2000) gehen in diese Richtung: Sie betonen, dass Animationen so gestaltet werden sollten, dass sie das zu vermittelnde konzeptuelle Wissen offensichtlich darstellen, damit dies von den Lernenden leicht wahrgenommen und begriffen werden kann („Prinzip des Ausdrucks“ und „Prinzip des Begreifens“).

Im Gegensatz zu dem Minimalismus-Prinzip von Schnotz & Lowe verfolgen Tversky et al. (2008) mit ihrem Beitrag „Enriching Animations“ einen anderen Ansatz: Mit der Aufforderung „It is time to teach animations“ verbinden sie das Ziel, Anforderungen an die Gestaltung von Animationen zu stellen, die sich an den Möglichkeiten einer Lehrperson in Lehr- Lernsituationen anlehnen. Animationen sollten durch diese Möglichkeiten angereichert werden: „They supplement assembly actions with language and gestures that serve several purposes: to separate steps, to indicate parts to be assembled, to preview action, and to demonstrate action and desired structure. Animations that are continuous in space and time rarely adopt these practices that humans do when teaching. It is time to “teach” animations, and these practices have potential. There is yet another task that animations can learn [...]: The narratives explain. Most animations just show. Showing isn’t explaining. If seeing the sequence of steps were sufficient for understanding, then we’d all be a lot smarter” (ebd., S. 281).

Mit dieser Unterscheidung, dass Animationen dem Lernenden zwar etwas zeigen, es nicht aber erklären, verdeutlichen Tversky et al. (2008), welche zusätzlichen Anforderungen ihrer Auffassung nach an die Gestaltung von Animationen zu stellen sind. Dazu nutzen sie die Metapher der Routenplaner, um diese erwünschte Funktionalität lernerangepasster Explorations-, Beschreibungs-, und Erklärungsmöglichkeiten analog auf Gestaltungsanforderungen für Animationen zu übertragen:

„Just like good explanations and good [route] maps, animations can include other views, other scales, other examples, other processes; they can use language and extra-pictorial devices to connect them. Animations can exaggerate and minimize and distort and highlight information. Animations can slow down, speed up, and stop for a moment to let learners absorb and study the current frame. Those frames can be preselected to be informative, the breakpoints in a continuous sequence. There is no guarantee that shifting focus from showing to explaining will produce animated graphics that are effective, but it does look promising” (ebd., S. 282).

Ob dieser Perspektivenwechsel tatsächlich seine Versprechen hält, bedarf ebenso weiterer Forschungen wie auch die Erkenntnisse zu den übrigen Aspekten instruktionaler Gestaltung von Animationen.

„In addition, further research is needed to determine the conditions under which animation is an effective instructional device, including the characteristics of the learner, material, and presentation features. In particular, Hegarty (2004) has shown that the next phase of research on learning with animation should move beyond asking whether animation is effective to asking how people learn with animation” (Mayer 2008, S. 46).

Dieser letzten aufgeworfenen Forschungsfrage möchte sich diese Arbeit aus mathematikdidaktischer Perspektive in dem Sinne widmen, "welchen Einfluss Animationen auf die (Raum-) Vorstellungsentwicklung wie haben können". Das "Wie" steht dabei im Mittelpunkt des Forschungsinteresses.

3 Die empirische Untersuchung

3.1 Forschungsmethode

In der vorliegenden qualitativen Untersuchung wird versucht, mittels Einzelfallstudien, auf der Basis von Beobachtungen von Schüleräußerungen und Schüleraktivitäten vor dem Hintergrund aller zur Verfügung stehenden Informationen zum jeweiligen Schüler – die Eindrücke aus der Unterrichtseinheit, die Schüler- und Lehrergespräche, die informellen Vor- und Nachtests und zentral die Einzel-Interviews mit den Schülern – den jeweiligen subjektiven Einfluss von Computeranimationen auf die (Raum-) Vorstellungsentwicklung zu beschreiben und zu verstehen.

Es soll aber nicht bei der Behandlung von Einzelfällen bleiben, sondern Ziel ist, innerhalb dieser Einzelfälle sowie durch Vergleich der Einzelfälle typische, extrem-, ideal- oder durchschnittstypische Handlungs- bzw. Verhaltensmuster zu identifizieren. Diese Muster sind zwar individuell festzumachen, keineswegs aber individuen-spezifisch – vielmehr manifestieren sich in ihnen generelle Strukturen (vgl. Lamnek 1995, S. 16).

Mit diesem qualitativen Vorgehen lehnt sich die vorliegende Studie dem Forschungsstil der "Grounded Theory" an, den Strübing (2004, S. 13f) als „Forschungsstil zur Erarbeitung von in empirischen Daten gegründeten Theorien“ bezeichnet, und will hypothesengenerierend einen Beitrag leisten zur Wirksamkeitsforschung zum Einsatz Neuer Medien.

Insbesondere „bei recht unterschiedlichen Fällen bieten sich zwecks Veranschaulichung Extremtypen an, um die maximalen Unterschiede zu demonstrieren. Verdeutlicht werden die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen, wobei im Falle der Bildung von Extremtypen die maximal entgegengesetzten Pole interessieren, die sich typologisch darstellen“ (Lamnek 2005, S. 232).

In diesem Sinne eignet sich auch die "Komparative Analyse", die Glaser & Strauss (1998) mit Hilfe der Strategie des theoretischen Samplings beschreiben: Bei der Auswahl der zu untersuchenden Einzelfälle steht nicht Repräsentativität im Vordergrund, sondern die Vermutung, dass neue Erkenntnisse gewonnen werden können.

Das zentrale Argument für eine qualitative Vorgehensweise gründet sich auf die Forschungstheorie: Während quantitative Forschung insofern theoriegeleitet ist, als der Untersuchungsverlauf durch Hypothesen bestimmt wird, die vorab aus der Theorie generiert wurden, verfolgt qualitative Forschung – nicht minder theoretisch fundiert – die genau entgegengesetzte Herangehensweise: Theoretische Vorannahmen werden nach Möglichkeit offen gehalten: „Ein zunächst noch wenig determiniertes theoretisches Vorverständnis wird in einem steten Austausch zwischen offener Materialerhebung und theoriegeleiteter Interpretation genauer bestimmt, verändert oder korrigiert“ (vgl. Beck & Maier 1993). Das Prinzip dieser induktiven und abduktiven Herangehensweise lässt sich somit als "hypothesengenerierend auf der Grundlage empirischer Beobachtungen" charakterisieren.

Die Einzelfallstudien wurden in Form offener Intensiv-Leitfadengespräche durchgeführt. Nach Atteslander (2006, S. 132) sind „Leitfadengespräche [...] das einzig sinnvolle Forschungsinstrument, wenn Gruppen von Menschen, die auch in großen Stichproben oft in zu kleiner Zahl angetroffen werden, erforscht werden sollen (Friedrichs, 1973, S. 226).“ Diese Form des Interviews „wird dort angewendet, wo es beispielsweise darum geht, [insbesondere] individuelle Erfahrungen zu eruieren“, um in irgendeiner Weise typische Handlungs- bzw. Verhaltensmuster zur Hypothesengewinnung zu identifizieren (ebd., S. 132).

Intensiv-Leitfadengespräche unterscheiden sich wesentlich durch Intensität und Dauer von normalen Leitfadenbefragungen (die Interviewdauer der vorliegenden Einzelfallstudien variierte zwischen 50 und 85 Minuten) und setzen daher eine außerordentlich hohe Bereitschaft des "Sich-Einlassens" des Interviewten voraus. Diese erhöhte Bereitschaft sollte bei den etwa zehnjährigen Schülern, die sich alle das erste Mal in einer Interviewsituation vor zwei Kameras befanden, unter anderem durch die Auswahl der Gesprächsmethode erreicht werden.

Die verwendete Gesprächsmethode orientiert sich an Grundideen der "Klientenzentrierung" nach Rogers (1945), die sich als "weiche" Elemente in der Gesprächsführung bezeichnen lassen (vgl. Diekmann 2005, S. 376). „Das Konzept des *weichen Interviews* [...] wurde erstmals [...] dargestellt von Rogers (1945, S. 279-283), der es anfänglich in der psychologischen Beratung und in der Psychotherapie erprobte und hernach für die Sozialforschung fruchtbar machte“ (Atteslander 2006, S. 126). Zentral

bei dieser Art Gesprächsführung ist die bewusste Aufgabe der Neutralitätsforderung durch zustimmende Reaktionen, um Hemmungen abzubauen, das Gespräch zu unterstützen und weitere Antworten zu ermuntern (vgl. Diekmann 2005, S. 376).

Unter zustimmenden Reaktionen werden Verhaltensweisen in der Gestik und Mimik sowie unterstützende sprachliche Hinweise, die Übernahme der Sprache des Interviewten zur Herstellung einer gemeinsamen Sprache und die Anwendung der Gesprächstechnik des "Spiegels" verstanden, bei der der exakte Wortlaut des Interviewten vom Interviewer wiederholt wird.

Ziel ist dadurch, die "Wege der Kinder unterstützend anzuregen bzw. ihren Wegen zu folgen", um hohe Gemeinsamkeit und erhöhte Tiefe in der Kommunikationssituation zu erlangen – dies Alles in der Annahme, dass eine von Sympathie getragene Beziehung zwischen Interviewer und Befragtem am ehesten die Offenheit der Antworten fördere, der Befragte sich hier völlig frei fühle, seine Gefühle und Meinungen ohne Angst vor Kritik o.ä. zu äußern (vgl. Phillips 1970, S. 111. In: Atteslander 2006, S. 126). Das „Ziel [der] Befragung muss also sein, eine möglichst hohe Gemeinsamkeit in der Kommunikation zu erreichen. Eine solche verhindert ein Ungleichgewicht der Motivation und erhöht die Gültigkeit einer Meinungsäußerung. [...]. Ist [...] der Grad der Gemeinsamkeit der Kommunikation höher, so ergibt sich auch ein höherer Grad an *Reaktionsspielraum*. Darunter wird das Ausmaß an Reaktionsmöglichkeit durch den Befragten verstanden: Je mehr eigene Erfahrungswelt in die Antworten einfließen kann, desto höher der Reaktionsspielraum. [...]. Je geringer der Grad der Gemeinsamkeit ist, desto asymmetrischer ist die Motivation der Beteiligten“ (Atteslander 2006, S. 119f).

Insgesamt lassen sich diese weichen Gesprächselemente als empathische Aspekte in der Gesprächsführung charakterisieren: Im Mittelpunkt steht neben der Vermittlung von nicht an Bedingungen gebundener Wertschätzung der interviewten Person eine grundlegend positive Einstellung des Interviewers gegenüber dem Interviewten mit dem Ziel eine Gesprächsatmosphäre zu erzeugen, die einem "offenen Gespräch unter Freunden" vergleichbar ist.

Die harten Elemente der verwendeten Gesprächsmethode – und damit die Art der Gesprächsführung nach Rogers aufweichend – lassen sich als "durch den Interviewer strukturierend und fordernd" charakterisieren. Diese Elemente dienen der (Neu-)

und (Um-) Strukturierung der Gesprächssituation durch den Leitfragenkatalog, den Verweis auf Widersprüche und das Einfordern von Begründungen.

Inhaltlich ging es in den Interviews um Vorerfahrungen mit dem Computer, zur Geometrie sowie um Einstellungen zur Schule und zum Fach. Im Mittelpunkt standen wechselseitig Phasen der medienspezifischen Auseinandersetzung mit bekannten und neuen Aufgaben zum räumlichen Vorstellungsvermögen und Phasen der Reflexion über Denkprozesse, Mediennutzung und -wirksamkeit.

Durch die Phasen des Reflektierens wird ein introspektives Vorgehen der Interviewten motiviert. Nach Mayring (2002) werden introspektive Daten mittlerweile als Informationsquelle für die Analyse und Interpretation in qualitativer Forschung anerkannt. Unter Introspektion (oder Selbstbeobachtung) wird „die Analyse eigenen Denkens, Fühlens und Handelns“ verstanden (ebd., S. 31).

Der Leitfragebogen zu den Interviews beinhaltet sowohl "offene" als auch "geschlossene" Fragen, die sich nach Atteslander (2006, S. 136f) theoretisch einordnen lassen: "Offene" (Rück-) Fragen wurden verwendet, um Antworten auf Vorerfahrungen zu eruieren, das Beschreiben und Erklären von Vorgehensweisen und Vorstellungen zu motivieren und Begründungen zu Antworten auf geschlossene Fragen genauer einzufordern. "Geschlossene" Fragen wurden in unterschiedlicher Weise in den Leitfragebogen eingebunden: Als Mehrfachauswahlfragen mit vorgegebenen Antwortalternativen sollten sie einen ersten Einblick in Einstellungen, Mediennutzung und Medienbewertungen ermöglichen. Mit der gleichen Intention wurden auch Skalen-Fragen unter der Kategorie "Einstellungen zur Schule / zum Fach" in den Leitfragebogen integriert. Sie werden insbesondere dann verwendet, wenn Werte, Meinungen oder Gefühle bzgl. ihrer Intensität oder Häufigkeit zum Ausdruck gebracht werden sollen. Bei Dialogfragen handelt es sich um eingekleidete Alternativfragen, die bspw. im Hinblick auf Mediennutzung eingesetzt wurden.

Zum Studium sämtlicher vorformulierter Interviewfragen sei der Leser auf den Interviewleitfaden im Anhang der Arbeit verwiesen.

Die Abfolge der Fragen innerhalb des Gesprächsleitfadens sollte in der konkreten Interviewsituation bewusst relativ offen bleiben können für die Wege der Kinder. Dieses Vorgehen ist an das "teils-strukturierte beziehungsweise wenig strukturierte Inter-

view" angelehnt, bei dem Gespräche aufgrund eines Gesprächsleitfadens mit bereits vorformulierten Fragen stattfinden und sich die Abfolge der Fragen auch an dem jeweils Interviewten orientiert und dadurch relativ offen bleibt.

„Die Bezeichnung ‚wenig strukturiertes Interview‘ deutet darauf hin, dass die Gesprächsführung flexibel ist, dass sowohl Vorstellungen des Befragers vorhanden sind, dass er auch bestimmte Ziele mit seinen Fragen verfolgt, dass er aber in hohem Maße den Erfahrungsbereich des Befragten zu erkunden sucht [...]. Hinweise, die ihm der Befragte gibt, nimmt er auf. Das Gespräch folgt nicht [nur] den Fragen des Interviewers, sondern die jeweils nächste Frage ergibt sich [auch] aus den Aussagen des Befragten. [...]. [Hierbei] hat [der Forscher] nicht nur auf den Verlauf des Gespräches zu achten, nicht nur Hinweise auf der Sprachebene und Bedeutungszusammenhänge wahrzunehmen, sondern auch die ganze Umgebung [den Gesamtkontext] zu beobachten. Der Forscher hat die Aufgabe, den Informationsfluss, das Gespräch in Gang zu halten. Es genügen meist ganz einfache, kurze Fragen, die sich auf die je vorhergehende Antwort beziehen und dadurch Sinnzusammenhänge in ihren Strukturen deutlich werden lassen. Das Ziel wenig strukturierter Befragungen ist, Sinnzusammenhänge, also die Meinungsstruktur des Befragten zu erfassen. Nachfragen sollen sich auf die Zentralität wesentlicher Meinungen beziehen. [...]. Nicht isolierte Reaktion auf einzelne Stimuli wird angestrebt, sondern offene Reaktionsmöglichkeiten des zu Befragenden“ (Atteslander 2006, S. 124).

3.2 Untersuchungsdesign und Datenerhebung

Zur Vorbereitung der Studie wurde in vier vierten Klassen eine achtstündige Unterrichtseinheit (inklusive informellem Vor- und Nachtest auf Papier) zur Thematik "Würfelnetze" durchgeführt, bei der Aufgabenstellungen jeweils mittels Material (den Schülern standen Papier und Schere zum Aufzeichnen und Ausschneiden von Netzen, quadratische Bierdeckel sowie Plastiksteckquadrate zur Verfügung) am Computerbildschirm und durch Netze auf Papier sowohl dargeboten als auch bearbeitet wurden. Um die Lehrervariable – damit sind spezifische Beliefs wie Vorlieben, Abneigungen und unterschiedliche Fachkompetenzen bezüglich des Computereinsatzes und des Geometrie- und Raumvorstellungsunterrichts angesprochen – möglichst gering zu halten, wurden die Unterrichtseinheiten von mir selber durchgeführt.

Bei den informellen Vor- und Nachtests mussten die Kinder allein mittels der Vorstellung

- entscheiden, ob sich ein vorgegebenes Netz zu einem Würfel zusammenfalten lässt,
- zu vorgegebenen Flächen eines Würfelnetzes gesuchte Flächen auffinden und benennen,
- entscheiden, welche Quadratflächen-Kanten beim Zusammenfalten aufeinander stoßen.

Ebenso wie die Unterrichtseinheit stehen auch die informellen Vor- und Nachtests nicht im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Mit ihnen wird nicht der Anspruch auf Validität und Reliabilität erhoben, da sie ohne wissenschaftliche Standards der Testentwicklung entstanden sind. Sie bieten lediglich die Möglichkeit eines zusätzlichen informellen Rückbezugs. Die selbstgewählten Kriterien zur Entwicklung und der informelle Vor- und Nachtest sind dem Anhang beigelegt.

Insgesamt nahmen 89 Viertklässler aus der Paderborner und Höxteraner Region Nordrhein-Westfalens an der Unterrichtseinheit teil. Auf der Basis dieses unterrichtlichen Bezugsrahmens wurden in jeder der vier Klassen mit zehn Kindern Einzel-Intensiv-Leitfadeninterviews durchgeführt. Die Auswahl der Kinder erfolgte in Absprache mit dem jeweiligen Klassenlehrer aufgrund von Beobachtungen während der Unterrichtseinheit und sollte ein möglichst heterogenes Leistungsspektrum überdecken. Kriterien zur Auswahl waren deshalb:

1. Wann löst sich das jeweilige Kind von der Computer- und / oder Material-Repräsentation und "weiteren unterstützenden Repräsentationen der Visualisierung des Lerngegenstandes" (Begleitbewegungen mit den Händen)?
"Frühe Loslösung" (bis einschließlich zur dritten Unterrichtsstunde): Die alleinige Verwendung der bereits entwickelten mentalen Repräsentationen ermöglicht eine erfolgreiche mentale Aufgabenbearbeitung.
"Späte bzw. gar nicht stattfindende Loslösung": Diese Verhaltensweisen wurden entgegengesetzt zur eben beschriebenen interpretiert.
2. Ergebnisse im informellen Vor- und Nachtest.
3. Wenn möglich, sollten in etwa gleich viele Jungen und Mädchen interviewt werden.

Insgesamt wurden 40 Kinder im Rahmen der Untersuchung interviewt. So sind als Datenmaterial ca. 55 Interviewstunden sowie 89 informelle Tests zu zwei unterschiedlichen Erhebungszeitpunkten entstanden.

3.3 Die Lernumgebung

Da der Unterrichteinheit nur eine vorbereitende Funktion für die Untersuchung zukommt, werden Struktur und Inhalt nur überblicksartig dargestellt.

Unterrichtsverlauf	Inhalt der Unterrichtsstunde(n)
1. Stunde:	Informeller Vortest
2./3. Stunde:	Wie viele Würfelnetze gibt es? Auffinden, Identifizieren und Konstruieren von möglichen Würfelnetzen
4./5. Stunde:	Wie viele Würfelnetze kannst du aus dem vorgegebenen "Fünf-Flächen-Netz" konstruieren?
6./7. Stunde:	Identifizieren von Deckflächen zu vorgegebenen Grundflächen in Würfelnetzen Erste Proto-Aufgaben der auf der Untersuchung basierend entwickelten Lernumgebung "Inter-Netzzo" (*)
8. Stunde:	Informeller Nachtest

Abbildung 10: Überblick über die Unterrichteinheit

Bis auf die mit (*) gekennzeichneten Aufgabenstellungen der 7. Unterrichtsstunde wurden alle weiteren jeweils mittels Material, am Computerbildschirm und durch Netze auf Papier sowohl dargeboten als auch bearbeitet. Die mit (*) gekennzeichneten Aufgabenstellungen wurden durch aufgezeichnete Netze auf Papier dargeboten und konnten nicht am Computerbildschirm bearbeitet werden.

Das zentrale Interesse der vorliegenden Arbeit richtet sich auf den Einfluss von Computeranimationen auf die (Raum-) Vorstellungsentwicklung. In den folgenden Unterkapiteln werden daher zunächst die computerbasierten Aufgabenstellungen sowie die genutzten Programme beschrieben, bevor darauf basierend Erwartungen zu Vorgehensweisen der Benutzer und Einflussmöglichkeiten der beschriebenen Computeranimationen auf die Vorstellungsentwicklung formuliert werden.

3.3.1 Analyse der computerbasierten Aufgabenstellungen

Die Aufgabenstellungen am Computer weisen folgende Charakteristika auf: Bei dem Programm "Matheland" muss zu einem auf dem Bildschirm vorgegebenen Netz mit eingefärbter Grundfläche zunächst entschieden werden, ob es überhaupt ein Würfelnetz ist ("Betätigen des Buttons 2 oder 3"), bevor die zugehörige Deckfläche durch Einfärben mit der Maus ("Farbpinsel") zu markieren ist (vgl. Abb. 11).

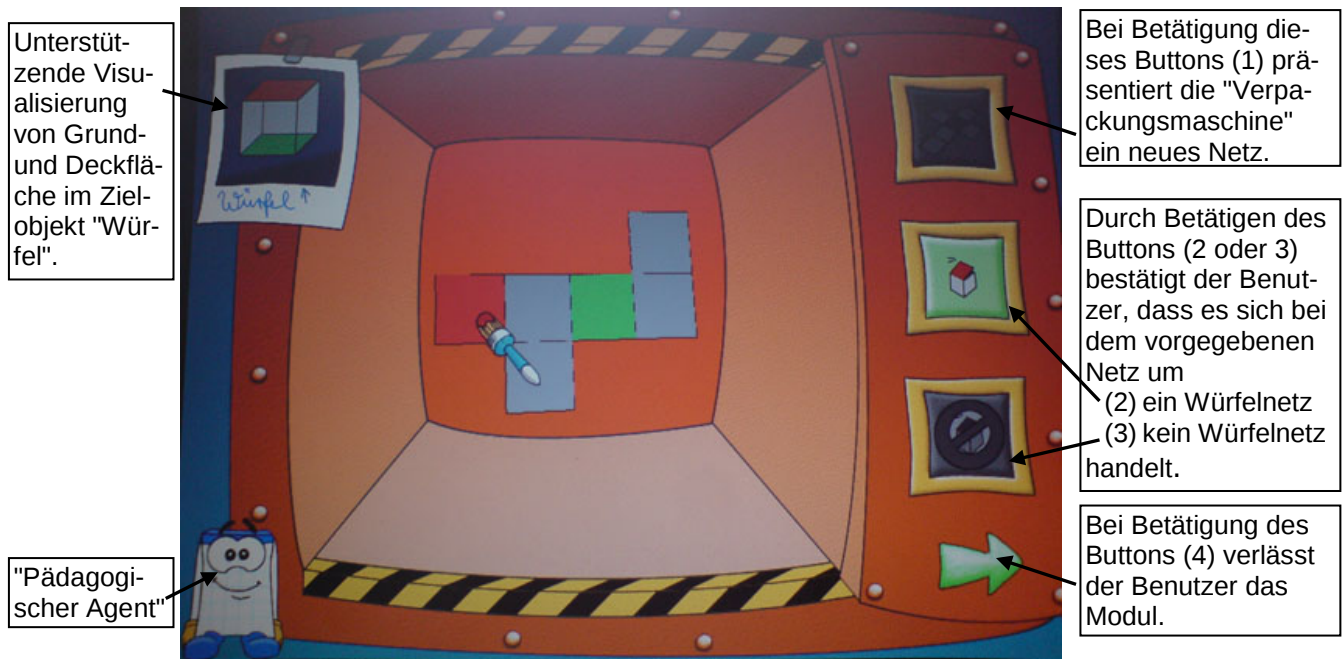


Abbildung 11: Programm "Matheland": Netze als "Verpackungen in der Lagerhalle"

Bei der Internetplattform "Mathematikus" muss zu einem visuell vorgegebenen "Fünf-Flächen-Netz" die sechste Fläche so mit der Maus positioniert werden, dass sich ein Würfelnetz ergibt (vgl. Abb. 12).

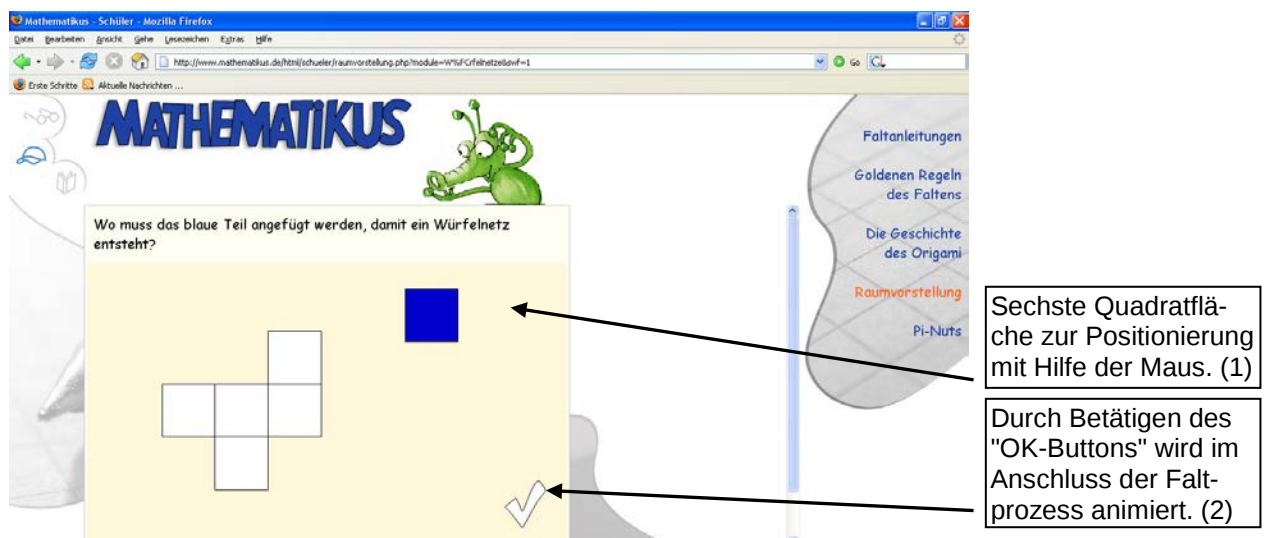


Abbildung 12: Internet-Plattform "Mathematikus": Modul Raumvorstellung "Würfelnetze"

In beiden Programmen erfolgt jeweils mittels eines animierten Faltprozesses (bei *"Matheland"* werden Flächen nacheinander, bei *"Mathematikus"* gleichzeitig gefaltet) eine visuelle Rückmeldung und damit eine Kontrollmöglichkeit durch die Schüler.

Im Unterschied zu dem Programm *"Matheland"* lässt sich bei der Internetplattform *"Mathematikus"* die Startsituation durch die jeweils sechste hinzuzufügende Quadratfläche variieren und kann dadurch zu einigen Explorationen anregen. Darüber hinausgehende individuelle, benutzergesteuerte Vorgehensweisen – wie unterschiedliche Faltgeschwindigkeiten, Teilfaltungen, Pausen im Faltprozess oder das Umsetzen beliebiger Flächen – sind in beiden Programmen nicht möglich.

Die animierten Faltprozesse lassen sich in beiden Programmen als Faltalgorithmen charakterisieren, da es sich bei der visuellen Darstellung um "immer gleich bewegte Bilder" handelt. Dieses Merkmal bietet den Vorteil, dass ein gesamter Faltvorgang zu Beobachtungs- und Analyse Zwecken wiederholt angesehen werden kann. Zugleich führt diese Eigenschaft jedoch jeweils auch zu dem Nachteil, dass individuelle, benutzergesteuerte Faltreihenfolgen ausgeschlossen werden, und es ist zu vermuten, dass die vorgefertigten Faltalgorithmen oft nicht mit den konkreten oder mentalen Faltreihenfolgen der Kinder übereinstimmen.

3.3.2 Analyse der genutzten Programme

"Matheland"

Bei dem Programm *"Matheland (Teil 2: 3./4. Schuljahr)"* handelt es sich um eine kostenpflichtige Edutainmentsoftware für den Nachmittagsmarkt. Unterschiedliche Lerninhalte sind im Rahmen einzelner Lernstationen ("die Lagerhalle", "der Saloon", ...) auf "spielerische Weise" mittels jeweiliger metaphorischer Alltagsrahmen ("Einkaufen", "Einarmiger Bandit", "Verpackungsmaschine", ...) in die Gesamtgeschichte *Matheland* eingekleidet.

Auf die Darstellung und Analyse weiterer Details zur *Gesamtkonzeption* der Software wird verzichtet, da dies nicht zielführend wäre. Die folgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf die Lernstation "Verpackungen in der Lagerhalle".

Ob die Verpackungsmaschine einen sinnvollen metaphorischen Alltagsrahmen darstellt, bleibt fraglich. Der Lerninhalt bietet durchaus auch als solcher seinen Reiz und

benötigt diese Einkleidung meines Erachtens nicht. Da es sich jedoch um eine Software für den Edutainmentmarkt handelt und alle Lernstationen im Matheland im Rahmen des durch den Benutzer zu "durchlebenden Abenteuers" miteinander verbunden sein müssen, werden mit der Software auch marktorientierte Interessen verfolgt.

In dem Modul erscheint der Aufbau übersichtlich und entsprechend des "Minimalismus-Prinzips" (vgl. Schnotz & Lowe 2008) auf das Wesentliche reduziert:

- Drei Buttons für eine sehr eingeschränkte inhaltsbezogene Benutzersteuerung der Verpackungsmaschine,
- ein Button zum Verlassen des Moduls,
- ein Button zum Anwählen eines "pädagogischen Maskottchens" und
- eine visuelle Repräsentation des Zielobjekts "Würfel" mit eingefärbter Grund- und Deckfläche zur unterstützenden Orientierung des Lernalers.

Wurde ein Netz durch Anklicken des Buttons (2) als Würfelnetz identifiziert, so soll in einem nächsten Schritt mit Hilfe des "Pinsels" die zu der vorgegebenen Grundfläche gehörige Deckfläche markiert werden. Daraufhin wird der Faltprozess animiert. Bevor jedoch die einzelnen Flächen nacheinander zu einem Würfel zusammengefaltet werden, wird das Netz durch eine geringfügige Rotation in eine neue Ausgangsposition gebracht. Dadurch wird die Flüchtigkeit der animierten Darstellung erhöht, es entstehen kognitive Mehranforderungen für den Nutzer und es ist zu erwarten, dass es einigen Nutzern schwerer fallen wird, den gesamten animierten Faltprozess und insbesondere Start- und Endposition einzelner Flächen beobachtend mitzuverfolgen.

Als weitere benutzergesteuerte Option bietet das Programm die Möglichkeit, das jeweilige Start- und Zielobjekt mit Hilfe der Computermaus beliebig zu rotieren: Ist es einem Schüler beispielsweise gelungen, eine Fläche während des Faltvorganges zu beobachten, die im Zielobjekt verdeckt ist, so kann er den Würfel mit der Computermaus in eine Raumlage rotieren, bei der die Fläche wieder ersichtlich wird.

Diese "Erkundungsmöglichkeiten" müssen jedoch als "sehr eingeschränkt" bewertet werden. Der Flüchtigkeit der animierten Darstellung wird dadurch kaum entgegen gewirkt und die zur detaillierten Beobachtung und Analyse bereits unter der "Analyse der Aufgabenstellungen" benannten benutzergesteuerten Möglichkeiten zur Individualisierung des Lernens fehlen.

Das pädagogische Maskottchen weist lediglich darauf hin, dass Fehler gemacht wurden, liefert aber keine konstruktive Rückmeldung. Die visuelle Repräsentation des Zielobjekts "Würfel" mit eingefärbter Grund- und Deckfläche dient, unter Rückbezug auf die Erkenntnisse zum Expertise Reversal Effect (vgl. Kalyuga 2005, S. 326ff; vgl. auch Kalyuga 2003, S. 333f), nur solange zur unterstützenden Orientierung des Lernenden, bis die Aufgabenanforderungen verstanden sind. Sodann wird die eigentlich hilfreiche Gestaltung der Lernumgebung redundant, das Bildschirmobjekt verliert seine orientierende Funktion und sollte ausgeblendet werden können.

Weitere Gestaltungsprinzipien, die sich mit der Anordnung der Objekte auf der Bildschirmoberfläche und ihrer sukzessiven Bedienabfolge auseinandersetzen, wurden weitgehend berücksichtigt.

"Mathematikus"

Bei der Internetplattform "Mathematikus" handelt es sich um eine frei zugängliche Internetseite, die als ergänzendes Additivum zum Grundschullehrwerk "Mathematikus" konzipiert wurde, sicher aber auch losgelöst davon genutzt werden kann und soll. Sie beinhaltet einen Lehrer- sowie Schülermodus und widmet sich vorwiegend geometrischen Inhalten. Im Mittelpunkt stehen Aufgabenstellungen zum Papierfalten und zur Raumvorstellung. Eine große Auswahl vielfältiger Faltfiguren, die durch schrittweise Animationen nach- bzw. mitgefaltet werden können, stehen dem Benutzer neben unterschiedlichen Modulen zur Raumvorstellung ("Burg", "Rollende Würfel", "Rotierende Körper", "Würfelnetze" und "Zerbrochene Würfel") zur Verfügung.

Bei den einzelnen Modulen steht stets der Inhalt im Vordergrund, auf nebensächliche Einkleidungen zur Dekoration oder scheinbaren Motivation wurde weitestgehend verzichtet. Auch hier wäre die Darstellung weiterer Details zur *Gesamtkonzeption* der Internetplattform nicht zielführend. Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher ausschließlich auf das Modul "Würfelnetze".

Der Aufbau des Moduls erscheint übersichtlich und entsprechend des "Minimalismus-Prinzips" (vgl. Schnotz & Lowe 2008) auf das Wesentliche reduziert:

- Durch die in der oberen Bildschirmmitte präsentierte Aufgabenstellung wird eine intuitive Benutzersteuerung intendiert: Der Schüler soll mit der Computer-Maus die blaue Quadratfläche an das "Fünf-Flächen-Netz" anfügen.

- Im Anschluss daran kann mittels des "OK-Buttons" der animierte Faltvorgang aktiviert werden und das ebene Startobjekt wird zum räumlichen Zielobjekt zusammengefaltet. Ebenso dient der "OK-Button" der Aktivierung des reversiblen Vorganges.

Weitere benutzergesteuerte Möglichkeiten sind nicht vorgesehen. Im Vergleich zu dem Programm "Matheland" besteht insbesondere auch nicht die Möglichkeit der benutzergesteuerten Rotation des Start- oder Zielobjektes.

Wurde ein Faltvorgang durch Anklicken des "OK-Buttons" animiert, werden die einzelnen Flächen gleichzeitig zu dem räumlichen Zielobjekt zusammengefaltet. Dabei wird das Objekt zusätzlich so rotiert, dass es auf eine Kante geneigt die Zielposition erreicht (vgl. Abb. 13):



Abbildung 13: Räumliche Lage des Zielobjektes auf eine Kante geneigt.

Die farbliche Sonderstellung der blauen Quadratfläche soll dem Benutzer Orientierung bei der Beobachtung bieten. Dadurch, dass jedoch keine weitere Orientierung, bspw. in Form einer markierten Grundfläche, gegeben wird, erscheint es unwahrscheinlich, dass die zur mentalen Simulation gewählte Grundfläche und demzufolge auch die mentale Simulation dem computeranimierten Faltvorgang entsprechen.

Vor allem auch durch die Gleichzeitigkeit des animierten Faltens besteht die Gefahr der Aufmerksamkeitsteilung ("Split-Attention Faktor"), weil der Aufmerksamkeitsfokus des Lernenden nicht zugleich auf alle relevanten Elemente gerichtet werden kann.

Beobachtungen und Analysen einzelner Faltprozesse sowie deren Auswirkungen werden durch die aufgezeigten Programmmerkmale erschwert und können nur eingeschränkt durch wiederholtes Ansehen des Faltvorganges vorgenommen werden. Der Flüchtigkeit der animierten Darstellung kann so zwar etwas entgegengewirkt werden, insgesamt jedoch wird sie durch die Programmmerkmale erhöht. Dem Benutzer tun sich kognitive Mehranforderungen auf, und es ist zu erwarten, dass es dadurch schwerer fallen wird, den gesamten animierten Faltprozess und insbesondere Start- und Endpositionen einzelner Flächen beobachtend mitzuverfolgen.

Die Rückmeldung (etwa zur Kontrolle) erfolgt in der Regel nur durch die Darstellung des räumlichen Zielobjektes. Der Benutzer soll daran lediglich erkennen, ob das Ergebnis seines zuvor mental simulierten Faltprozesses mit dem computeranimierten Ergebnis übereinstimmt, beziehungsweise ob er die sechste Quadratfläche an eine geeignete Stelle des "Fünf-Flächen-Netzes" positioniert hat oder nicht.

Wurde jedoch die sechste Quadratfläche so an ein Startobjekt angefügt, dass sich dadurch vier zusammenhängende Quadratflächen zu einer größeren Quadratfläche ergänzen (vgl. Abb. 14), kann es bei den Schülern leicht zu Irritationen kommen, da in einem derartigen Fall kein zugehöriger Faltvorgang animiert wird.

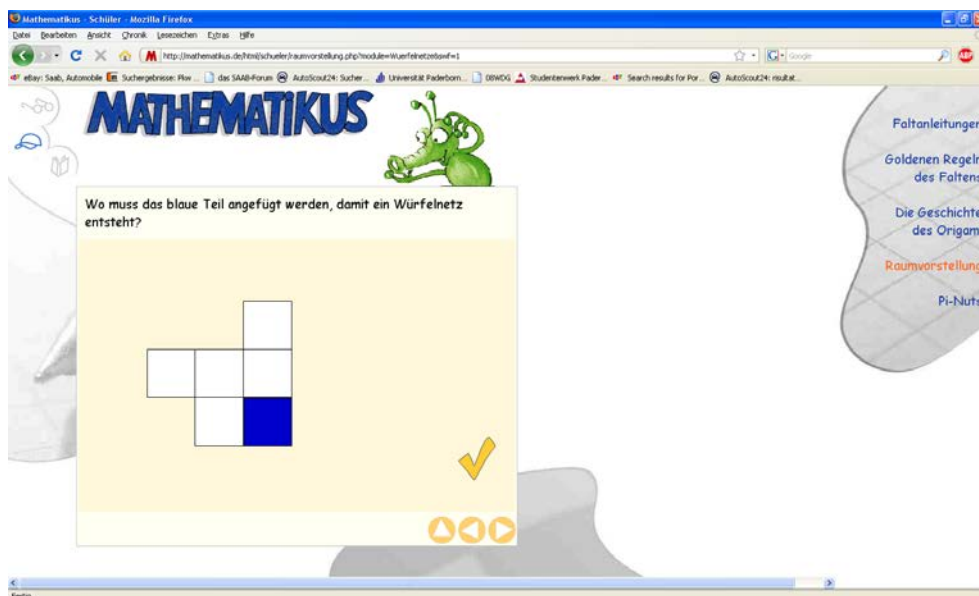


Abbildung 14: "Falsches" Netz nach Betätigen des "OK-Buttons".

Nach Betätigen des "OK-Buttons" verbleibt das Netz in seiner Startposition. Der Benutzer soll diese Situation als nicht möglichen Faltvorgang interpretieren. Stattdessen

würde die Animation eines Teilfaltprozesses meiner Meinung nach eine geeignetere visuelle Rückmeldung zur Orientierung des Lernenden bieten.

Die folgenden Bildschirmrepräsentationen sind meiner Auffassung nach redundant und hätten durchaus auch ersetzt bzw. weggelassen werden können:

- Die Menüleiste am rechten Bildschirmrand visualisiert durch farbliche Markierung, in welchem Menü sich der Benutzer aktuell befindet ("Faltanleitungen", "Goldene Regeln des Faltens", ...). Da sich ein Benutzer zuvor bereits für dieses Modul entschieden haben musste, ließe sich diese Menüleiste durch einen Button zum Verlassen des Menüs ersetzen.
- Am linken Bildschirmrand geben Symbole Auskunft darüber, welcher Programm-Modus aktiviert ist (Brille – "Lehrer", Kappe – "Schüler", Aufgeschlagenes Buch – "Verknüpfung zum Lehrwerk"). Auch diese Visualisierung ist überflüssig, da sich der Benutzer auf der Startseite der Plattform bereits für den Lehrer- oder Schüler-Modus "anmelden" musste und der Link zum Lehrbuch in keinerlei inhaltlichem Zusammenhang mit den Modulen steht.
- Das Logo mit dem grünen Maskottchen in der oberen Bildschirmmitte soll den Benutzer eventuell daran erinnern, auf welcher Internetplattform er sich gerade befindet. Auch diese Visualisierung ist entbehrlich.

Zusammenfassung für beide Programme

Die von Schnotz & Lowe (2008, S. 352) geforderte Berücksichtigung einer Balance zwischen freien Explorationsmöglichkeiten, individuellen Lernereigenschaften (Vorkenntnisse, Arbeitsgedächtniskapazität) und dem Bereitstellen äußerer Unterstützung findet insgesamt wenig Anwendung, da durch die festgelegte Programmstruktur nur eine einheitliche Benutzersteuerung "für alle" vorgesehen ist.

Beide Programme bieten Faltalgorithmen, die in kontinuierlich-animierter Weise dargestellt werden. Benutzergesteuerte schrittweise Animationen werden hingegen nicht ermöglicht. Zur Beobachtung und Analyse der animierten Faltvorgänge verlagert sich die angesprochene Balance dadurch auf das Bereitstellen äußerer Unterstützung.

Ebenfalls bleibt die von Boucheix (2008, S. 230) geforderte Orientierung an den spezifischen Aufgabenanforderungen und den damit verbundenen Lernzielen bei der Verwendung von Animationen unberücksichtigt.

Das mentale Zusammenfalten von Netzen kann für Individuen durchaus den Stellenwert eines komplexen dynamischen Prozesses haben, bei dem es sich nach Boucheix eben nicht eignet, einen hohen Grad an Benutzersteuerung einzurichten, insbesondere dann nicht, wenn die Faltprozesse simultan verlaufen.

Jedoch eignen sich meines Erachtens die dargestellten Animationen im besonderen Maße dazu, durch (benutzergesteuerte) Elementarisierung den Vorstellungsaufbau und damit die (Weiter-) Entwicklung mentaler Modellierungen zu vereinfachen: Wird der gesamte Faltvorgang in vorgegeben animierte oder durch den Benutzer zu steuernde Teilschritte zerlegt, so kann bei beiden Varianten durch die Kontrollmöglichkeiten des Benutzers das "Imitations-Lernen", das "learning by doing" und das Verständnis der zerlegten schrittweisen Lernaufgaben unterstützt werden. Zudem wäre denkbar, dass durchgeführte Faltprozesse im Programmhintergrund dokumentiert werden und der Benutzer nach einzelnen Teilschritten und am Ende seiner (Computer-) Handlung eine Animation seines Tuns ansehen kann.

Insgesamt ließe sich mit diesen beiden Modi das von Boucheix gezeichnete Spektrum von Aufgabenanforderungen und Maß an Benutzersteuerung abdecken sowie die von Tversky et al. (2008, S. 281) geforderte Funktionalität lernerangepasster Explorations-, Beschreibungs- und Erklärungsmöglichkeiten für Animationen berücksichtigen.

Die Entscheidung, trotz der aufgezeigten Kritikpunkte die beiden Programme im Rahmen der Untersuchung zu verwenden, fällt ich aufgrund folgender Argumente:

1. Mitarbeit Fachdidaktik: Beide Programme sind unter der Regie von Mathematikdidaktikern entwickelt worden. Mit diesem Argument wird der Primat der Fachdidaktik unterstellt. An der Entwicklung der Internetplattform Mathematikus wirkten federführend die Mathematikdidaktiker Jens Holger Lorenz und Klaus Peter Eichler unter Mitarbeit der Lehrerinnen Herta Jansen und Angelika Röttker mit. Die Software Matheland entstand in Zusammenarbeit von Jens Holger Lorenz mit dem Psychologen Gerd Scheimann.

2. Aktualität auf dem deutschsprachigen Markt: Zum Zeitpunkt der Untersuchung (Februar bis Juni 2005) bieten beide Programme nach meinem Kenntnisstand die einzigen aktuell auf dem deutschsprachigen Markt existenten Animationen zu diesem Lerninhalt.
3. Zugang und Verbreitung: Mathematikus ermöglicht einen direkten kostenfreien Zugang ohne CD-Anschaffung, was seiner Verbreitung förderlich sein dürfte. Die Tatsache, dass sich Matheland seit 1998 unverändert auf dem Markt befindet, scheint neben den erfolgreichen Verkaufszahlen vor allem auf die Qualität dieses Programms hinzudeuten oder aber auf einen ungesättigten Markt, der mangels Alternativen immer noch das alte Produkt kauft.

3.3.3 Erwartungen

Auf Basis der vorgenommenen Analysen zu den programmtechnischen Voraussetzungen, den sich daraus ergebenden Möglichkeiten und auf dem Hintergrund der kognitionspsychologischen Erkenntnisse beim Lernen mit Animationen nehme ich eine erste zusammenfassende Analyse im Hinblick auf zu erwartende Vorgehensweisen der Benutzer und Einflussmöglichkeiten der beschriebenen Computeranimationen auf die Vorstellungsentwicklung vor.

Beide Programme legen dem Benutzer nahe, zuerst Entscheidungen aufgrund mentaler Modellierungen zu treffen, bevor die Computeranimation aktiviert wird.

Generell muss bereits hier unterschieden werden, ob ein Benutzer vor der Aktivierung des jeweiligen Animationsprozesses eine eigenständige mentale Modellierung durchführt bzw. durchführen kann oder nicht durchführt bzw. nicht durchführen kann.

Beide Programme können aber auch in einer reinen "Trial-and-Error-Variante" bedient werden, indem bspw. "nur rumgeklickt" oder die Animation "direkt zur unterstützenden Visualisierung" aktiviert wird. Die mentalen Anforderungen werden dadurch entweder (mehr oder weniger bewusst) "*umgangen*", oder aber sie werden zum unterstützenden Aufbau eigenständiger mentaler Modellierungen "*zunächst ersetzt*".

Genau in dieser Unterscheidung manifestiert sich die Motivation des Benutzers:

Ist er zur mentalen Modellierung im Stande (1) oder auch nicht im Stande (2) und *umgeht* die mentalen Anforderungen oder ist er zur eigenständigen mentalen Modellierung noch nicht in der Lage (3) und nutzt diese "Trial-and Error-Variante" zum Aufbau mentaler Modellierungen? Der verbleibende, eher unwahrscheinliche vierte Fall kennzeichnet einen Benutzer, der zur eigenständigen mentalen Modellierung in der Lage ist, und diese durch die "Trial-and Error-Variante" zum Aufbau einer alternativen mentalen Modellierung *ersetzt*.

Die einzelnen Fälle im Überblick:

Der Lernende ist zur eigenständigen mentalen Modellierung ...	Mentale Anforderungen werden durch die "Trial-and Error-Variante" umgangen .	Mentale Anforderungen werden durch die "Trial-and Error-Variante" ersetzt ...
... nicht im Stande	Motivationsprobleme? Passungsprobleme zwischen Lerner und Lerngegenstand? (2)	... zum Aufbau einer eigenständigen mentalen Modellierung. (3)
... im Stande	Motivationsprobleme? Passungsprobleme zwischen Lerner und Lerngegenstand? (1)	... zum Aufbau einer eigenständigen alternativen mentalen Modellierung. (4)

Abbildung 15: Überblick über die verschiedenen Dispositionen des Nutzers

Auf individuumsinterner Ebene lassen sich vorab keine tiefer liegenden Gründe für das *Umgehen* der mentalen Anforderungen identifizieren (Fall (1) und Fall (2)). Mit Blick auf die instruktionale Gestaltung der beiden Animationsprogramme treten jedoch folgende Aspekte in den Vordergrund:

- Keine Vergleichsmöglichkeit der individuellen mentalen Faltprozesse mit den computeranimierten Faltalgorithmen.
- Wenig lernerangepasste Benutzeroptionen.
- Flüchtigkeit animierter Darstellung.
- Intuitivität und Eingänglichkeit der direkten Darstellung.

Bereits jeder einzelne dieser Aspekte kann ein *Umgehen* der mentalen Anforderungen begünstigen. Bei den verwendeten Programmen treten sie jedoch in Kombination miteinander auf, so dass diese Gefahr gesteigert wird.

Im Folgenden wird der Blick auf die jeweiligen Fälle gerichtet, bei denen mentale Anforderungen durch die Computeranimationen "ersetzt" werden (Fall (3) und Fall (4)):

Bei Kindern, die bereits im Stande sind, den mentalen Modellierungsprozess zu leisten, lässt sich erwarten, dass sie ihren Aufmerksamkeitsfokus nur auf den Vergleich von mentalen und computeranimierten Start- und Endpositionen richten werden ("*Matheland*": markierte Deckfläche; "*Mathematikus*": blaues Quadrat). Da sich der mentale Faltprozess vom computeranimierten Faltprozess oft unterscheiden wird, haben die computeranimierten Faltprozesse für diese Kinder höchstens den Stellenwert einer Visualisierung eines alternativen Vorgehens. Mit der Aufforderung zur gezielten Beobachtung des computeranimierten Prozesses können diese Kinder im Anschluss an die eigenständige Modellierung durch wiederholtes Ablaufen-Lassen der Animation den alternativen Prozess mental transformieren und eine eigene mentale Modellierung des von der Computeranimation vorgegebenen Prozesses aufbauen.

Kinder, die die eigenständige mentale Modellierung noch nicht leisten können, werden eher beides, den computeranimierten Faltprozess und die jeweiligen Start- und Endlagen einzelner Flächen (insbesondere der markierten Deckfläche – "*Matheland*"; bzw. der blauen Quadratfläche – "*Mathematikus*"), beobachten und versuchen, sich den vorgegebenen Prozess zur Entwicklung einer eigenständigen mentalen Modellierung vorzustellen. In diesen Fällen kann die Intuitivität und Eingänglichkeit der direkten computeranimierten Darstellungsart der Faltvorgänge eine orientierende Funktion zum Aufbau von Vorstellungen haben.

Darauf basierend lassen sich abschließend die beiden folgenden Lernszenarien beschreiben:

A) Ausgangssituation: Der Lernende führt eine eigenständige mentale Modellierung durch.

1. Vorgegebene computerbasierte Aufgabenstellung
2. Mentale Modellierung des Faltvorganges
3. Aktivierung der Animation und visuelle Rückmeldung
4. Vergleich von computeranimierten und mental modellierten Start- und Endlagen ("*Mathematikus*": blaue Quadratfläche; "*Matheland*": Deckfläche) durch den Lernenden

Zusätzlich im Falle des Aufbaus einer alternativen Modellierung:

5. Beobachtung des computeranimierten Faltalgorithmus zum Aufbau einer alternativen mentalen Modellierung

B) Ausgangssituation: Der Lernende kann eine eigenständige mentale Modellierung nicht durchführen.

1. Vorgegebene computerbasierte Aufgabenstellung
2. "Trial- and Error"-Vorgehen
3. Aktivierung der Animation und visuelle Rückmeldung
4. Beobachten des computeranimierten Faltvorganges zum Aufbau einer eigenständigen mentalen Modellierung

3.4 Datenauswertung

„Der Antwortende lügt nie – die zutreffende Interpretation dessen, was er sagt, hängt vom Können des Analytikers ab. Eine Antwort, wie immer sie zustande gekommen ist, kann also nur innerhalb eines fundierten und nachvollziehbaren Bezugsrahmens interpretiert werden (Manning 1967, S. 315)“ (In: Atteslander 2006, S. 107).

Die Vorgehensweise bei der Analyse und Interpretation lässt sich der "qualitativen Inhaltsanalyse" (vgl. Mayring 2000) sowie der "Objektiven Hermeneutik" (vgl. Oevermann 2000) zuordnen.

Mayring (2000) beschreibt drei Grundformen der "qualitativen Inhaltsanalyse", „die auch als "Mischformen" zum Einsatz kommen können“ (Diekmann 2005, S. 512): Zusammenfassung, Explikation und Strukturierung. Unter Zusammenfassung wird die Reduktion auf den wesentlichen Inhalt des Materials verstanden. Durch Abstraktion soll dabei das Grundmaterial durch einen überschaubaren Textkorpus abgebildet werden. Mit Hilfe der Strukturierung lässt sich das Material nach bestimmten Aspekten ordnen. Der Grundgedanke der Explikation ist, dass zu einzelnen Textteilen zusätzliches Material zur Analyse und Interpretation herangezogen wird. Mayring beschreibt in diesem Zusammenhang den "engen" und den "weiteren" Textkontext als zwei verständnisunterstützende Quellen für die zu interpretierende Textstelle. Somit lässt sich die Explikation insgesamt als Kontextanalyse verstehen:

Der "enge Textkontext" fokussiert die Bezüge im Text und direkten Textumfeld der zu interpretierenden Textstelle. Der "weitere Textkontext" bezieht neben einem größeren Textumfeld insbesondere über den Text hinausgehende Informationen über den Verfasser, den Interpreten und das kulturelle Umfeld, aber auch Informationen über die Entstehungssituation sowie nonverbales Material in die Analyse und Interpretati-

on mit ein. Insgesamt soll hierdurch das Verständnis der zu interpretierenden Textstelle vertieft werden, indem bestimmte Deutungsvarianten der Interpretationen gestützt bzw. ausgeschlossen werden können.

Das analytische Vorgehen in der vorliegenden Studie kann als "Mischform" dieser drei Grundformen beschrieben werden.

Zudem lehnt sich das interpretative Vorgehen an den Zielen der "Objektiven Hermeneutik" (Oevermann 2000) an: „Das Verstehen und Deuten ist die Methode, welche die Geisteswissenschaften erfüllt. Alle Funktionen vereinen sich in ihm. Es enthält alle geisteswissenschaftlichen Wahrheiten in sich. An jedem Punkt öffnet das Verstehen eine Welt“ (Dilthey 1958, S. 205).

Um diese einzelnen Welten verstehen zu können, müssen sie durch das "Erkennen von Wahrheiten" aufgeschlossen werden. Die "Objektive Hermeneutik" geht davon aus, dass im Zentrum eines jeden zu interpretierenden Einzelfalles ein "Strukturkern" – im Sinne des Zitats: "eine verschlüsselte Wahrheit" – existiert. Das Ziel objektiv-hermeneutischer Arbeit ist, die Strukturformel – oder in den Worten des Zitats: "die Wahrheit" – des Falles durch Entschlüsselung zu rekonstruieren und dadurch den Fall zu verstehen (vgl. Oevermann 2000).

Methodisch wird dabei in der Regel so vorgegangen, dass einzelne Sequenzen und jeder Interakt sukzessive interpretiert werden. Dabei soll dem zu interpretierenden Element durch möglichst verschiedene, auch unwahrscheinliche Lesarten, besonders viel Sinn beigefügt werden. Unter der Entwicklung verschiedener Lesarten wird die Konstruktion von Kontextbedingungen verstanden, unter denen das zu interpretierende Element sinnvoll erscheint. Dadurch, so die Hoffnung, können im gesamten Interpretationsprozess bestimmte Deutungsvarianten und Interpretationen ausgeschlossen werden, und die zur Beschreibung des Strukturkerns des Falles geeignete Interpretation schält sich mehr und mehr heraus.

Auf Basis dieses theoretischen Gesamtrahmens zur Analyse und Interpretation beschreibe ich nun das konkrete auswertungsmethodische Vorgehen in meiner Studie:

In einem *ersten* Schritt wurde ausgewähltes Interviewmaterial einzelner Schüler zu kleineren Kontexteinheiten zusammengefasst, und zwar entlang des Interviewleitfadens und orientiert an den jeweiligen Fragestellungen, unter Berücksichtigung von

Mimik, Gestik, Sprache, Betonungen, Pausen und Bearbeitungszeiten. Hierdurch waren folgende Kategorien als *erste* Beobachtungsperspektiven vorgegeben:

- Vorerfahrungen mit dem Computer
- Einstellung zur Schule / zum Fach
- Vorerfahrungen / Vorkenntnisse Geometrie - Raumvorstellung
- Auseinandersetzung mit Aufgaben zu (Würfel-) Netzen (jeweils mit Material; Computer; Papier)
- Reflektieren über Denkprozesse, Mediennutzung, Medienwirksamkeit.

Zu den letzten beiden Punkten war das Interviewvorgehen derart strukturiert, dass ein steter Wechsel zwischen konkreter Aufgaben-Bearbeitungsebene und der jeweiligen Reflektionsebene von den Kindern gefordert war.

Die Auswahl der ersten fünf Interviews erfolgte aufgrund der Erfahrungen während der Interviewdurchführung und lehnt sich an das Vorgehen der "Komparativen Analyse" nach Glaser & Strauss (1998) an: Durch die Auswahl sollte ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Verhaltensweisen und Bewertungen abgedeckt werden, um für weitere zu analysierende Interviews eine breite, eventuell noch zu verfeinern- de Basis zur Verfügung zu haben. In einem späteren Schritt sollen durch Abstraktion von dieser subjektiven Ebene in irgendeiner Weise typische Handlungs- bzw. Verhaltensmuster identifiziert werden.

In einem *zweiten* auswertungsmethodischen Schritt wurde die Analyse und Interpretation aufgabenspezifisch mittels vier unterschiedlicher Ebenen vorgenommen:

Ebene 1	Aufgaben-Bearbeitung: Konkret belegbare Handlungs-, Tätigkeits- und Verhaltensebene des Kindes im Interview zu Aufgabenstellung x
Ebene 2	Analyse- und Interpretationsebene zu Ebene 1
Ebene 3	Reflexions- und Bewertungsebene des Kindes zu Ebene 1
Ebene 4	Analyse- und Interpretationsebene zu Ebene 3 unter Rückbezug auf die Ebenen 1 und 2

Abbildung 16: Vorgehen bei Analyse und Interpretation

Dieses Vorgehen ermöglichte Vergleiche im Hinblick auf Plausibilität und Authentizität der Antworten und Bewertungen der Schüler:

- Plausibilität: Passt die Bewertung des Kindes mit der konkret belegbaren Handlungs- und Tätigkeitsebene zusammen?
- Authentizität: Antwortet das Kind "sozial erwünscht" oder authentisch?

Da „durch Sprache immer nur ein Ausschnitt des Erlebbaren und Erlebten erfasst wird, [ist] die Verwendung verbaler Ausdrücke [...] nie allein aus theoretischen und literarischen Verwendungen abzuleiten, sondern muss im Grunde in jedem Falle der empirischen Überprüfung ausgesetzt werden. Das heißt, einzelne Ausdrücke sind im gesamten Verlauf der Interaktion zu erproben“ (Atteslander 1988, S. 940).

Diesem Anspruch folgend konnten in einem *dritten* Schritt größere Kontexteinheiten durch In-Beziehung-Setzen kleinerer Kontexteinheiten gebildet werden. Dazu wurden sämtliche Aussagen mit ihren zugehörigen Analysen und Interpretationen losgelöst von ihrem Textumfeld zu folgenden Kategorien zusammengefasst und erneut im Hinblick auf Plausibilität, Authentizität, subjektive Handlungs- und Verhaltensweisen und beobachtbare überindividuelle Muster vergleichend analysiert und interpretiert:

Kategorie I	Allgemeine Zusammenfassung zum Interviewten: – Vorerfahrungen mit dem Computer / im Geometrieunterricht – Einstellung zur Schule / zum Fach – Aussagen der Lehrperson über bisherigen Unterricht, zur Klasse und zum Kind sowie eigene Beobachtungen und Eindrücke während der Unterrichtseinheit
Kategorie II	Vorgehensweisen und Strategien bei der Bearbeitung der Aufgaben
Kategorie III	Verwendung und Bedeutung von Sprache
Kategorie IV	Bewertung der einzelnen Medien (Vor- und Nachteile)
Kategorie V	Medieneinsatz, Loslösung vom Computer
Kategorie VI	Eigenverantwortlichkeit des Lernalers

Abbildung 17: Gebildete Kategorien nach Analyse und Interpretation

Gemäß diesem Kategoriensystem wurden insgesamt 13 der 40 erstellten Interviews analysiert und interpretiert: In einem ersten Durchgang wurden zehn Interviews bear-

beitet. Bereits nach sieben Interviews zeichnete sich ab, dass keine weiteren Beobachtungen zu erfassen sind, die nicht schon bis dahin aufgetreten waren.

Im Anschluss daran sollte ein zweiter Durchgang Klarheit über die vermutete Sättigung verschaffen. Durch drei weitere Interviews, die nach gleicher detaillierter Vorgehensweise analysiert und interpretiert wurden, konnte diese bestätigt werden.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung werden in drei Schritten dargestellt. Um zunächst einen *ersten* allgemeinen Überblick zu den grundsätzlichen kategorienbezogenen Beobachtungen zu erhalten, wurden sinnvolle Quantifizierungen (vgl. Mayring 2002, S. 37f) über die Interviewdaten vorgenommen.

In einem *nächsten* Schritt wird in Anlehnung an die "Komparative Analyse" (vgl. Glaser & Strauss 1998) und die Fallkontrastierung mittels Extremtypen ein Spektrum bzgl. beobachteter Verhaltensweisen und erkennbarer Muster aufgezeigt.

Bei der Auswahl der dargestellten Einzelfälle steht deshalb nicht Repräsentativität im Vordergrund, sondern sie werden nach dem Kriterium neuer, zu vermutender bzw. entdeckter Erkenntnisse ausgewählt. So konnten im Rahmen der Studie mittels zweier extremtypischer Fallbeispiele die Ränder eines Spektrums bzgl. des Einflusses von Computeranimationen aufgezeigt werden. Innerhalb dieses Spektrums ließen sich durch den Vergleich von Einzelfällen "immer wiederkehrende Strukturen (Stereotypen)" und damit überindividuelle Verhaltensweisen erkennen.

In einem *dritten* Schritt werden diese und weitere Phänomene unter der Perspektive der Cognitive-Load-Theorie beleuchtet.

In sämtlichen verwendeten Transskriptauszügen kennzeichnen fett markierte Textstellen sprachliche Betonungen.

4.1 Allgemeine Ergebnisse

4.1.1 Ausgangssituationen

Die Schüler der Klassen A. (25 Kinder) und O. (24 Kinder) in Bad Lippspringe verfügen über schulische Erfahrungen zu "Standardthemen des Geometrieunterrichts", bei denen es vorwiegend um die Fertigkeit des Zeichnens geht (Arbeit mit Lineal und Geo-Dreieck: "Parallelen", "Senkrechte", "Zeichnen von Figuren und Körpern"). Die Lehrer der betreffenden Klassen vermeiden nach eigenen Angaben aufgrund fachlicher Unsicherheiten solche geometrische Themen, bei denen die Raumvorstellung bedeutsam wird. Zudem „*fehle, durch die sonstigen inhaltlichen Anforderungen im Schuljahr bedingt, oft die Zeit für derartige Themen*“.

Die Schüler der Klasse L. (16 Kinder) in Sandebeck verfügen über vertiefte Erfahrungen mit geometrischen Lerngegenständen: Die Klasse wurde für den wöchentlich mehrfach stattfindenden Förderunterricht, der sich ausschließlich geometrischen Inhalten in eher projekt- und werkstattartiger Form widmete (Symmetrie - Werkstätten zu Spiegelungen und Parkettierungen; Dreitafelprojektionen - Werkstatt zu den Nikitin-Materialien), in zwei leistungshomogenere Gruppen aufgeteilt.

Da die Lehrerin C. neben dem Mathematikunterricht in ihrer Klasse (24 Kinder) auch den Förderunterricht in der Klasse L. durchführt und die inhaltliche Vorbereitung für unterrichtliche Standardthemen gemeinsam stattfindet, verfügen die Kinder der Klasse C. in Bergheim über vergleichbare Erfahrungen im Geometrieunterricht.

Bis auf die Klasse der Lehrerin O., in der der Computer im Mathematikunterricht als Additivum bei den schriftlichen Rechenverfahren eingesetzt wurde, ist in den übrigen Klassen bisher kein Computer im Mathematikunterricht verwendet worden.

4.1.2 Allgemeine Strategien bei der Aufgabenbearbeitung

Im Folgenden werden Vorgehensweisen und Strategien allgemein und losgelöst von der jeweiligen Medienverwendung beschrieben: Diese lassen sich in die beiden Kategorien "Auf bekanntes Wissen zurückgreifen" und "(Erneut) mit Hilfe von mentalen Modellierungen erproben" unterscheiden.

Mit den Formulierungen der Kinder „*ich hab die auswendig gewusst*“ und „*die hab ich im Kopf zusammengefoldet*“ lassen sich diese grundsätzlich unterschiedlichen Vorgehensweisen charakterisieren.

Als Indikatoren dienten neben den Aussagen der Kinder die Mimik, Gestik und insbesondere das Erfassen der Bearbeitungszeiten.

„Ich hab die auswendig gewusst“ – Mental abgespeicherte Propositionen

Diese Vorgehensweise ist abhängig von bereits vorgenommenen symbolhaften Zuordnungen und dadurch individuell hochgradig unterschiedlich: Je nach dem, zu welchem Netz eine Zuordnung der Form „*das sieht aus wie ...*“ oder „*das ... ist eins*“ erfolgt ist, wurden die betreffenden Netze direkt über die jeweilig abgespeicherte Proposition als Würfelnetze identifiziert (Bearbeitungszeit der Aufgabe kürzer als 2 sec.).

In den nachstehenden Tabellen werden die vorgenommenen Zuordnungen mit Hilfe von Zitaten der Kinder dargestellt:

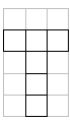
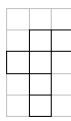
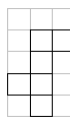
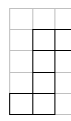
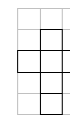
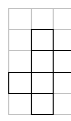
Die „Vierer-Würfelnetze“						
„Sieht aus wie ...“	... ein T“	(x ₁)	(x ₂)	... die Vierer-schlange“	... ein Kreuz“	(x ₃)

Abbildung 18: Zuordnungen bei den "Vierer-Würfelnetzen" (mit vier Quadraten in einer Linie).

Die mit (x) gekennzeichneten Netze wurden oftmals durch eine Kombination von Reduktionsstrategie und Auswendig-Wissen identifiziert: „Da ist der Linke von dem T einen (x₁) bzw. zwei (x₂) runtergerutscht und von dem T weiß ich, dass es eins ist. Also ist das [(x₁) bzw. (x₂)] auch eins.“ – Entsprechend zu (x₃): „Da ist der Linke von dem Kreuz einen (x₃) runtergerutscht.“

Implizit wurde dabei die Erkenntnis genutzt, dass „man auf jeder Seite der Viererstange einen haben muss, damit's n' Würfelnetz is. [...] Weil die Viererstange ergibt ja nen Ring, so'n Mantel drumrum. Dann brauch man nur noch einen auf jeder Seite“ (Zitat aus dem Interview mit Johannes, sinngemäß auch Melanie, Lena, Michaela).

Bei den „Dreier-Würfelnetzen“ und dem „Zweier-Würfelnetz“ waren entsprechende Vorgehensweisen zu beobachten:

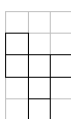
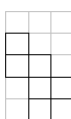
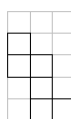
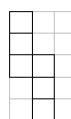
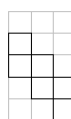
Würfelnetz					
„Sieht aus wie ...“	... eine 4“	... eine Ente“ (x ₄)	(x ₅)	... die Dreier-Schlange“	... das einzige Zweier-Netz“

Abbildung 19: Zuordnungen bei den "Dreier- Würfelnetzen und dem Zweier-Würfelnetz".

Bei (x₄) bzw. (x₅) ließ sich wiederum die oben benannte Kombination von Auswendig-Wissen und Reduktionsstrategie beobachten: „Da ist der Rechte von der 4 einen (x₄) bzw. zwei (x₅) runtergerutscht.“

Ob jedoch die propositionalen Zuordnungen jeweils aufgrund vorheriger mentaler Modellierung erfolgten und als Abstraktion davon zu verstehen sind, oder aber durch Übernahme dieser Erkenntnis von einem Mitschüler vorgenommen wurden, lässt sich im Detail nicht klären.

„Ich hab die im Kopf zusammengefaltet“ – Mentales Modellieren

Diese Vorgehensweise konnte besonders in drei Fällen beobachtet werden:

- Bei individuenspezifisch noch unbekannten Netzen.
- Als (mehrfache) Kontrolle bei Netzen, bei denen sich die Schüler aufgrund einer hohen Anzahl mentaler Behaltensprozesse unsicher sind (diese Anzahl ergibt sich aufgrund der mental durchzuführenden Faltprozesse im Zusammenhang mit den vorzunehmenden Faltrichtungsänderungen).
- Bei Netzen, die sich nicht zu einem Würfel zusammenfalten lassen, da hier die Argumente für das "Nicht-Passen" ausfindig gemacht werden mussten.

Da es sich bei den individuenspezifisch unbekannten Netzen um unterschiedliche Netze handelt, werden bei den folgenden Beispielen nur Netze dargestellt, die sich nicht zu einem Würfel zusammenfalten lassen:

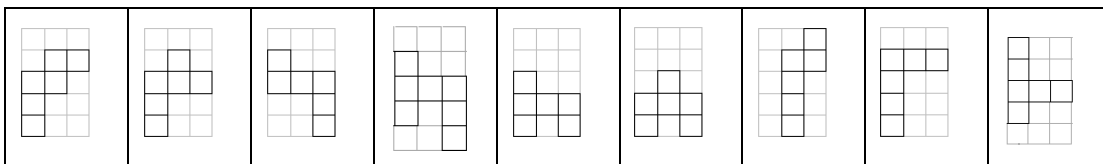


Abbildung 20: Netze, die mit der Vorgehensweise "Mentales Modellieren" bearbeitet wurden.

Während einigen Kindern bei dem vierten Netz auffiel, dass es aus sieben Quadratflächen besteht und „es deshalb schon nicht gehen kann“, wurden die übrigen Netze „im Kopf zusammengefaltet“. Als Indikatoren für dieses Vorgehen dienten Bearbeitungszeiten, die pro Aufgabenstellung bis zu 23 sec. in Anspruch nahmen, die Aussagen und Beschreibungen der Kinder sowie der Einsatz von unterstützenden Begleitbewegungen mit den Händen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Immer dann, wenn die Vorgehensweise "Auswendig-Wissen" nicht angewendet werden konnte oder keine offensichtlichen Widersprüche (das Sieben-Flächen-Netz) entdeckt wurden – insgesamt also keine Möglichkeit des Zurückgreifens auf bekanntes Wissen bestand, mussten die Objekte erneut mit Hilfe von mentalen Modellierungen erprobt werden.

In Anlehnung an das bereits dargelegte Begriffsverständnis von Schnotz (2006a, S. 168 sowie 2006b, S. 79) wird in diesem Zusammenhang unter einer mentalen Modellierung eine primär analog-bildhafte Vorgehensweise verstanden, bei der Veränderungen am konkret vorliegenden Objekt mit Hilfe mentaler Operationen durchgeführt und in der Form kausaler Zusammenhänge beschrieben werden.

Bei der Beschreibung der kausalen Zusammenhänge wurden Raum-Lage-Beziehungen bzw. Veränderungen dieser fokussiert und als "Wenn-Dann-Aussagen" im Zusammenhang mit "Überlappings- oder Lochstrategien" formuliert.

Unter der "Überlappingsstrategie" werden Vorgehensweisen zusammengefasst, bei denen während des mentalen Faltprozesses geprüft wurde, ob zwei Flächen überlappen. Die Beschreibungen einzelner Kinder verdeutlichen, dass die Aufmerksamkeit systematisch auf mögliche "Überlappungen" gerichtet wurde, da immer in dieser Weise argumentiert wurde, wenn die Begründung für das "Nicht-Passen" erfolgte.

Als "Lochstrategie" werden Vorgehensweisen bezeichnet, die das komplementäre Vorgehen beschreiben. Während des mentalen Faltprozesses wird überprüft, ob "ein Loch im Würfel bleibt" und dadurch das Zielobjekt "Würfel" nicht entstehen kann.

Neben Kindern, die konsequent eine der beiden Strategien anwendeten, konnten auch "Strategiewechsler" beobachtet werden: Je nach dem, welche der beiden Eigenschaften sie in ihrem mentalen Modellierungsprozess zuerst entdeckten, wurde die Argumentation entsprechend aufgebaut.

Die "Zentralität der gewählten Grundfläche im Netz" lässt sich als weitere grundsätzliche Strategie für einen bevorstehenden mentalen Modellierungsprozess festhalten. Bei jedem Sechsfächernetz, bei dem die einzelnen Flächen nicht so angeordnet sind, dass sich vier zusammenhängende Quadratflächen zu einer größeren Quadratfläche ergänzen, müssen insgesamt fünf Faltprozesse ausgeführt werden. Je nach vorgegebenem Netz und gewählter Grundfläche können diese durch arithmetisch unterschiedliche Zerlegungen beschrieben werden: Fasst man dazu die vier Kanten der Grundfläche als einzelne Summanden auf, die es "auf maximal fünf (Quadratflächen) aufzufüllen gilt", so treten insgesamt alle möglichen Zahlzerlegungen der 5

- in vier Summanden auf (im Falle, dass alle möglichen Kanten der Grundfläche betrachtet werden – 0 als Summand zugelassen) bzw.
- in einem, zwei, drei oder vier Summanden auf (im Falle, dass die jeweils mit Flächen belegten Kanten der Grundfläche betrachtet werden – 0 als Summand nicht zugelassen).

Alle Kinder platzierten die eigenständig zu wählende Grundfläche in einem Netz "eher zentral", wodurch die Anzahl der mentalen Behaltensprozesse und damit die

Komplexität sowie die kognitive Belastung bei der mentalen Modellierung reduziert wird (Strategie zur Vermeidung von Cognitive (Over-) Load). Flächen am Rande des Netzes wurden hingegen nicht als Grundflächen gewählt.

In der Sprache der kombinatorischen Modellierung: Die jeweilige Grundfläche wurde vorwiegend so im Netz platziert, dass der gesamte Faltvorgang in 2+3, 1+2+2, 1+1+3 oder 1+1+1+2 Faltprozesse zerlegt werden konnte. Vorgehensweisen, bei denen der Faltvorgang in 1+4 Faltprozesse zerlegt wurde oder gar alle 5 Faltprozesse an nur einer Grundflächenkante gebunden waren, ließen sich hingegen nicht beobachten.

Aufgrund der introspektiven Beschreibungen der Kinder kann man zudem vermuten, dass in der Regel einzelne und daran gebundene Flächen zusammenhängend mental nacheinander gefaltet werden und bis zu zwei an unterschiedlichen Grundflächenkanten gebundene Flächen mental gleichzeitig gefaltet werden. Die "mentale Faltgeschwindigkeit" scheint dabei abhängig zu sein von der Anzahl der zu faltenden aneinander gebundenen Flächen sowie von der Anzahl der Falt-Richtungswechsel im Faltprozess und damit insgesamt von der Anzahl mentaler Behaltensprozesse.

4.1.3 Eigenverantwortlichkeit des Lernalers

Vertiefende Betrachtungen hierzu werden durch die Analyse der einzelnen Fallbeispiele erfolgen. Insbesondere im Fall "Johannes" wird mit dessen Ausführungen zur Motivation und seiner Unterscheidung, „*ob dir der Computer etwas vorsagt oder etwas zeigt*“ die Eigenverantwortlichkeit für sein Lernen verdeutlicht werden. Diese sehr reflektierte Haltung zum Computer und zur Bedeutung dieses Mediums für das eigene Lernen zeigte sich auch in vielen weiteren Interviews, z.B.:

„Man sieht, wie man sich das vorstellen kann, wie's zu 'nem Würfel wird, ist'n Vor- und'n Nachteil, aber kommt darauf an, wie man's macht, ob man nur so rumklickt oder ob man's genau anguckt und sich's vorher schon versucht vorzustellen“ (Johannes, sinngemäß auch Togay und Jan).

Zur Analyse und weiteren Verdeutlichung soll hierzu ergänzend ein Transkriptausschnitt von Thomas herangezogen werden. Auf die Frage, was ihm bei seinen Bearbeitungen am meisten geholfen habe, äußert er:

Thomas: „Der PC, weil wir dort gucken konnten, ob es richtig ist und so und dann konnte ich mir das viel besser vorstellen“

Interviewer: „Mmh, konntest Dir das viel besser vorstellen? Musstest Du dir denn noch was vorstellen?“

Thomas: „Eigentlich nicht so. [...]. Ja, aber eigentlich musste man da schon 'n bisschen mitdenken.“

Interviewer: „Wo musstest du denn da denken?“

Thomas: „Ja, ob das überhaupt geht so. Als erstes habe ich erst mal selber geguckt, ob das geht und dann habe ich am PC kontrolliert. [...]. Mir fällt gerade ein, ein Nachteil beim PC, dass man beim PC nachgucken kann, eigentlich - ist der Nachteil.“

Interviewer: „Ist der Nachteil?“

Thomas: „Ja, eigentlich schon. Dass man nachgucken kann.“

Interviewer: „Aha?“

Thomas: „Das ist eigentlich ein Vorteil und ein Nachteil.“

Interviewer: „Ist ein Vorteil und ein Nachteil?“

Thomas: „Ja, weil einerseits kann man dann nachgucken, und dann denkt man: Ah, ich hab nicht richtig gelegt, dass muss ich mir merken. Und einerseits, dann denkt man: Ah, weiß ich nicht, drück ich mal drauf, ab und zu, und wenn's nicht geht, ja ist eigentlich, dann denkt man auch noch eigentlich 'n Vorteil, dass man sich das merken kann, eigentlich. Aber wenn man das nicht weiß so und man drückt drauf, eigentlich 'n Nachteil, weil man das nicht weiß.“

Thomas sieht zugleich einen Vor- und einen Nachteil in der Computeranimation. Zur Argumentation legt er in dem letzten Interviewabschnitt drei verschiedene Sichtweisen dar. Hieran spiegeln sich die unterschiedlichen Lernszenarien wieder, die bei der Analyse der Programme herausgearbeitet wurden:

Bei seiner *ersten* Annahme geht er davon aus, dass ein Lernender zuerst eine eigenständige mentale Modellierung des vorgegebenen Netzes durchführt und anschließend mit Hilfe der Computeranimation durch Beobachtung und Analyse prüfen kann („nachgucken“), ob sich seine mentale Modellierung als geeignet erweist. Im Bedarfsfall kann er die Computeranimation zur Weiterentwicklung seiner mentalen Modellierung nutzen, indem er darauf basierend erneut mental handelt. (Lernszenario A: Mentale Modellierung – Beobachten und Analysieren der Computeranimationen – Handeln: Reflektieren und Weiterentwickeln der mentalen Modellierung).

Seiner *zweiten* Sichtweise liegt die Annahme zu Grunde, dass der Lernende nicht in der Lage ist, eine eigene mentale Modellierung des vorliegenden Netzes durchzuführen. Zur Unterstützung nutzt er die Computeranimation als Werkzeug zur Exploration, um dadurch Analysen zur eigenen Entwicklung mentaler Modellierungen vornehmen zu können und reflektiert zu handeln (Lernszenario B: Keine mentale Modellierung – Computeranimation als Werkzeug zur Exploration, dabei Beobachten und Analysieren – Handeln: Reflektieren und Entwickeln einer mentalen Modellierung).

Mit seiner *dritten* Perspektive richtet er den Fokus auf Situationen, in denen Lernende nicht in der Lage sind, mentale Modellierungen auszuüben und die Computeranimationen ohne Beobachtung und Analyse passiv mit- bzw. nachvollziehen („*nur draufdrücken*“). Dadurch, dass der gesamte Handlungsablauf inklusive Problemlösung visualisiert dargeboten wird, wird der Lernende zur mentalen Passivität verleitet. Thomas erkennt darin den Nachteil, weil der Lernende in diesen Fällen nur zusieht und notwendige Beobachtungs-, Analyse-, und Reflexionsprozesse zur Entwicklung mentaler Modellierungen nicht vollziehen muss bzw. nicht vollzieht („*weil man das nicht weiß*“).

Solange der Lernende in der Auseinandersetzung mit den Computeranimationen jedoch zunehmend zielgerichtete Beobachtungs-, Analyse-, und Reflexionsprozesse durchführt (Lernszenarien A und B), sieht Thomas in der Arbeit mit den Computeranimationen einen Vorteil zur (Weiter-) Entwicklung mentaler Modellierungen.

Diese Deutungen bekräftigt auch Jan:

*„Ich meine, das [räumliche Vorstellungsvermögen] wird schlechter, weil am Computer kann man so ganz doll einfach klicken, „gibt eins“, und dann sieht man das ist keins und dann kann man alles ausprobieren und dadurch wird's schlechter. Und wenn man das aber gezeigt kriegt, das ist wie inner Schule: Wenn man immer abguckt, wird man nie besser, aber wenn **man's mal gezeigt kriegt und erklärt kriegt, dann wird mein Vorstellungsvermögen und Denken besser**. Also ich meine der Computer macht das schlechter, aber kommt darauf an, wie man's macht: Wenn manche am Computer sich das vorstellen erst, und dann gucken ob's wirklich eins wird, dann wird's nicht schlechter.“*

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass ein relativ hohes Reflexionsvermögen im Hinblick auf die kritische Auseinandersetzung mit dem Computer als Medium beobachtbar ist und keineswegs von einer "naiven Computergläubigkeit" ausgegangen werden muss.

4.2 Spektrum von Verhaltensmustern – drei Prototypen

Im Folgenden werden in methodischer Anlehnung an die "Komparative Analyse" (vgl. Glaser & Strauss 1998) und die Fallkontrastierung mittels Extremtypen drei prototypische Verhaltensmuster präsentiert und damit ein Spektrum bzgl. beobachteter Verhaltensweisen und erkennbarer Muster aufgezeigt: Die Auswahl der dargestellten Einzelfälle stellt das Spektrum unterschiedlicher Möglichkeiten des Einflusses von Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung dar.

Die beiden extremtypischen Fallbeispiele "Michi" und "Jan" markieren die Ränder dieses Spektrums, "Johannes" steht prototypisch für einen Lernenden in der Mitte.

4.2.1 Fallbeispiel Michi

Michi hat bisher sehr wenig private und schulische Vorerfahrungen mit dem Computer gesammelt. Im Deutsch- und Sachunterricht hat sie Texte mit Word verfasst, im Mathematikunterricht wurde ein Computerprogramm zum Üben des Schriftlichen Rechnens eingesetzt. Geometrie- und Raumvorstellungsunterricht hat sie ihrer Einschätzung nach sehr wenig bekommen. Dies deckt sich auch mit den Aussagen der Lehrerin. Michi macht den Eindruck, dass sie der Schule insgesamt sehr positiv gegenüber steht, bezogen auf Mathematik jedoch frustriert ist und mittlerweile ein negatives Selbstkonzept entwickelt hat. Die Lehrerin bestätigt diese Einschätzung und charakterisiert Michi, vor allem in Mathematik, als eine schwächere Schülerin.

Zu Beginn der Unterrichtseinheit versucht Michi, sich mit den ausgeschnittenen Materialnetzen auseinander zu setzen. Nach ausgiebigen Versuchen legt sie das Material mit den Worten „*Ich kann mir das nicht merken. Ich krieg das irgendwie nicht hin*“ zur Seite. Anschließend wendet sie sich intensiv den Computeranimationen zu: Zu ein- und demselben Faltprozess sieht sie sich immer und immer wieder die faltalgorithmische Darstellung der Computeranimation an. Darauf folgend arbeitet sie erneut mit den Materialnetzen, entweder mit vorhandenen oder aber sie fertigt sich eines an, indem sie das computeranimiert dargestellte Netz vom Bildschirm kopiert. Dieses Verhalten ließ sich während der gesamten Unterrichtseinheit bei ihr beobachten: Zunächst arbeitet sie in der eben beschriebenen Weise mit den Computeranimationen, darauf folgend setzt sie sich mit dem zugehörigen Materialnetz auseinander.

Im Vortest (s. Anlage) bearbeitet sie nahezu die Hälfte der Aufgaben korrekt, einige gar nicht. Im Nachtest löst sie alle Aufgaben richtig. Auf die Frage, welches Medium ihr am meisten geholfen habe, sich die räumlichen Anforderungen vorzustellen, antwortet sie im Interview:

Michi: „Der Computer. Da konnte man, der hat das für mich zusammengebaut (M fasst sich mit beiden Händen zum Kopf), ich musste nur, wo er sich zusammengebaut habe, gucken wo die Dech ... Deckfläche ist. Das konnte ich ja dann sofort sehen.

Interviewer: „Mmh, ok, und ähm, jetzt frag ich halt noch mal weiter: Haben dir deine eigenen Gedanken auch dabei geholfen?“

- Michi: „Ja, bisschen.“
 Interviewer: „Bisschen. Am meisten?“
 Michi: „Der Computer.“
 Interviewer: „[...] und die Aufgaben auf Papier?“
 Michi: „**Da muss ich das ja im Kopf zusammenbauen. Ich bin im Kopf nicht so gut.**“ [...]
 Michi: „Ich hab [mir die Computeranimationen an-] geguckt ... hab ´m, hab gesehen ob es n Würfelnetz ist oder nicht und **hinterher** konnte ich mir das **auch noch** im Kopf vorstellen.“
 Interviewer: „Und **vorher** konntest du das nicht im Kopf vorstellen?“
 Michi: „Ne, nicht so richtig.“

Mit ihrer Aussage „**Da muss ich das ja im Kopf zusammenbauen**“ beschreibt sie Anforderungen, die mit den Aufgaben auf Papier an sie gestellt werden. Ihre wertende Betonung legt nahe, dass sie kein Vertrauen in ihre Gedanken hat und wenig Hilfen dadurch erfahren kann, weil sie von sich glaubt, „*im Kopf ja nicht so gut*“ zu sein.

Auf die Frage „*Was hat dir dabei am meisten geholfen bei den Aufgaben?*“ antwortet sie ohne Umschweife direkt „**Der Computer**“. Der Interviewer ist durch ihre vorschnelle Aussage merklich verunsichert, da eigentlich zunächst Antwortalternativen benannt werden sollen: „*Der Computer, die Aufgaben auf Papier, das Material oder deine Gedanken?*“ Allein die Tatsache, dass Michi direkt antwortet und dem Interviewer "ins Wort fällt", ohne überhaupt die Alternativen zu kennen, aus denen sie wählen soll, verdeutlicht über ihre inhaltliche Aussage hinaus den unterstützenden Stellenwert, den sie den Computeranimationen für ihren Lernprozess beimisst.

Doch worin besteht dieser unterstützende Einfluss der Computeranimationen, der ihr hilft, sich räumliche Anforderungen „*hinterher*“ vorstellen zu können, die sie sich „*vorher nicht so richtig*“ vorstellen konnte?

Auf die Frage „*Wo wird dein räumliches Vorstellungsvermögen mehr gefördert?*“ verweist Michi auf die Aufgabenstellungen auf Papier und benennt eine für sich hilfreiche Stufenfolge des Medieneinsatzes:

„Da (M zeigt auf Papier-Sets) **muss** ich mir das selber vorstellen. Und da (M zeigt auf den Computer) stellt der das eigentlich für **mich** vor (M fasst sich dabei mit beiden Händen vom Computer ausgehend zum Kopf). Hier (M zeigt auf den Computer) kann ich meine Anfangsschritte machen am Computer, dass ich da rein komme, dass ich´s weiß, wie es funktioniert und wenn ich das dann **langsam weiß**, kann ich auch **damit** arbeiten (M zeigt auf die Aufgaben auf dem Aufgabenblatt), **dann** kann ich mir das ja selber vorstellen.“

Ihre betonte Unterscheidung der Medien nimmt sie aufgrund der jeweils bereitgestellten immanenten Hilfen vor. Michi ist davon überzeugt, dass ihr räumliches Vorstellungsvermögen am meisten mit dem Medium gefördert wird, bei dem ihr die wenigsten Hilfen zur Verfügung stehen. Die Aufgabenstellungen auf Papier verweisen sie allein auf "ihren Kopf", da **muss** sie es sich selber vorstellen.

Trotz oder gerade wegen ihres negativen Selbstkonzeptes ist ihr sehr reflektiert bewusst, dass gerade mit dem Medium, mit dem sie nur auf ihren Kopf verwiesen wird – worauf sie am wenigsten vertraut – ihr räumliches Vorstellungsvermögen am meisten gefordert und gefördert wird. So argumentiert sie, dass die Aufgaben auf Papier am schwierigsten sein müssen und deswegen ihr räumliches Vorstellungsvermögen hiermit am meisten gefördert werden muss.

Durch ihre Betonung, Gestik und Mimik lässt Michi ihrer Aussage „*der stellt das eigentlich für **mich** vor (M fasst sich dabei mit beiden Händen vom Bildschirm ausgehend zum Kopf)*“ besondere Bedeutung zukommen. Durch die Bewegung ihrer Hände vom Bildschirm zu ihrem Kopf versucht sie, dem Interviewer gegenüber ihren stark betonten Ausspruch „für **mich**“ zusätzlich zu unterstreichen und die Bedeutung der Computeranimationen für ihren Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen – verstanden als den mentalen Transformations- und Verinnerlichungsprozess von dynamisch-räumlichen Bilderfahrungen, die sie durch die Computeranimationen sammeln konnte – zu verdeutlichen. Es geht ihr hierbei nicht um *irgendwelche* Bilderfahrungen, die hätte sie auch durch das simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen mit Hilfe von Material sammeln können. Vielmehr geht es ihr darum, dass es der Computer „für **mich**“ vorstellt und dadurch kognitive Anforderungen, die sonst von Michi selbst zu leisten wären, ersetzt. Diese "Vorstellungsarbeit", die der Computer für sie übernimmt, spricht sie explizit an:

Interviewer: „Aber musst du dir dabei [bei der Arbeit mit den Computeranimationen] noch was vorstellen?“

*Michi: „Nicht viel. Es ist leichter. **Der macht** das ja für mich.“*

Damit ist zunächst einmal die Frage verbunden, welche Anforderungen an Lernende bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen im Zusammenhang mit den beiden Medien "Material" und "Computer" gestellt werden?

Das *Beobachten computeranimierter Handlungen* im Vergleich zum *simultanen Durchführen und Beobachten eigener Handlungen*

Das "reine Beobachten computeranimierter Handlungen"

Das zielgerichtete konkrete Handeln – und damit Struktur und Orientierung – wird hier von den Computeranimationen "ersetzt". Der Lernende kann sich in der Rolle des "Beobachters dieser Fremdhandlungen" "zurücklehnen" und konzentrieren, **auf** die vor ihm ablaufende Handlung schauen und diese "nur" analysieren. Durch diese "Außenperspektive **auf** die Dinge" wird ihm Überblick über die Gesamthandlung ermöglicht, ohne darin durch konkretes Tun involviert zu sein. Seine Analysen kann er vornehmen, indem er sich die Computeranimationen mehrfach ansieht und dabei Hypothesen entwickelt und prüft. Es geht um das Generieren und Verifizieren von Hypothesen durch mehrfaches, zunehmend zielgerichtetes **Hinsehen** und Beobachten.

Das "simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen"

Das zielgerichtete konkrete Handeln – und damit Struktur und Orientierung – ist hier vom Lerner selbst "zu leisten" und involviert ihn somit als "Akteur der Handlung" **in** die Durchführung des gesamten Handlungsprozesses. Dadurch wird er selbst als "Teil der Handlung – zum Teil der Situation" und nimmt eine Beteiligtersicht bzgl. des Lerngegenstandes ein (im Folgenden als "Binnenperspektive" bezeichnet). Dabei ist der Lernende als "Akteur und zugleich Beobachter seiner Handlungen" **in** die Handlungen involviert und muss zugleich **auf** seine Handlungen schauen.

Er kann sich nicht nur als "Beobachter seiner Handlungen" mit Blick **auf** die Handlung "zurücklehnen" und diese "nur" analysieren, sondern er muss die Handlung außerdem eigenständig planen und durchführen. Dazu muss der Lernende mentale Planungsprozesse für einzelne Teilschritte sowie für die Gesamthandlung vollziehen und zudem sein gesamtes Tun analysieren und reflektieren. Damit ist er gefordert, einen ständigen Perspektivwechsel zwischen der Durchführung ("Binnenperspektive") und der Beobachtung ("Außenperspektive") eigener Handlungen vorzunehmen. Diese übergeordnete Perspektive, die das Integrieren beider Perspektiven bzgl. des Lerngegenstandes erfordert, bezeichne ich im Folgenden als "Hybridperspektive". Bei seinen Analysen geht es insgesamt um das Generieren und Verifizieren von Hypothesen durch mehrfaches, zunehmend zielgerichtetes **Handeln** und Beobachten.

Im Vergleich zu dem "reinen Beobachten fremder (animierter) Handlungen" stellt das "simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen" bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen durch die vorzunehmenden Perspektivwechsel und durch den Anspruch eigenständiger Strukturierung und Orientierung somit höhere kognitive Anforderungen an den Lerner.

Es scheint, dass Michi durch diese Mehranforderungen überfordert ist: Sie schafft es zwar, Handlungen mit dem Material durchzuführen und sich eventuell sogar einzelne Faltprozesse vorzustellen, sie ist dabei aber so sehr mit den Handlungen am Material beschäftigt und "Teil der Situation", dass es ihr nicht gelingt, sich selber dabei zu beobachten und ihr gesamtes Tun zu analysieren, weil sie die "Binnenperspektive" einnehmen muss. In der Auseinandersetzung mit dem Material fehlt ihr scheinbar die "Außenperspektive" und damit der Überblick über den gesamten Faltprozess.

Diese Außenperspektive bieten die Computeranimationen: Sie strukturieren durch den visuell vorgegebenen Handlungsablauf die Gesamthandlung und bieten ihr dadurch Überblick und Orientierung bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen. Sie veranschaulichen unmittelbar die Dynamik des Sachverhalts und ermöglichen ihr so eine visuelle Unterstützung der mentalen Simulation.

Michi kann sich in der Rolle des Beobachters dieser Fremdhandlungen "auf eine Sache konzentrieren" und dadurch einen ersten Zugang zum aktiven Mit- und Nachvollziehen, und damit zur Beobachtung und Analyse finden, ohne in die Handlung durch konkretes Tun involviert zu sein.

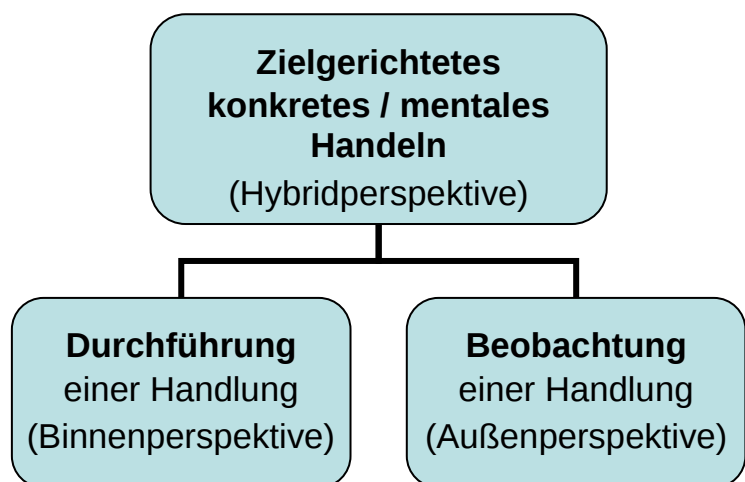


Abbildung 21: "Hybrid-, Binnen- und Außenperspektive"

(Computer-) Animationen können so den Zugang zu lernrelevanten Analyseprozessen **ermöglichen** und unterstützen, und leisten damit einen Beitrag zur aktiven und selbstständigen Durchführung mentaler Simulationsprozesse. Dadurch kann auch Michi mehr und mehr die Rolle der "zielgerichtet mental handelnden Akteurin" einnehmen.

Dies verdeutlicht auch ihre hilfreich empfundene Stufenfolge des Medieneinsatzes:

*„Hier (M zeigt auf den Computer) kann ich meine Anfangsschritte machen am Computer, dass ich da rein komme, dass ich's weiß, wie es funktioniert und wenn ich das dann **langsam weiß**, kann ich auch **damit** arbeiten (M zeigt auf die Aufgaben auf dem Aufgabenblatt), **dann** kann ich mir das ja selber vorstellen.“*

Der Computer hat für sie den Nutzen eines visuellen Ideengebers und dynamischen Visualisierers, der ihr zeigt, worum es insgesamt geht (WAS) und wie sie sich räumliche Veränderungsprozesse vorstellen kann (WIE). Hier kann sie ihre „Anfangsschritte“ machen, ohne in die Handlung durch konkretes Tun involviert zu sein. Sie kann sich "zurücklehnen" und erst einmal "nur" zusehen, damit sie „da rein kommt und weiß, wie es funktioniert“, um dadurch *langsam* einen ersten Zugang zum aktiven Mit- und Nachvollziehen und damit zur Beobachtung und Analyse zu finden.

Dieser Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen verläuft bei ihr langsam. Deswegen ist sie sich aufgrund ihrer eigenen Lernerfahrungen – zu ein- und demselben Faltprozess sah sie sich immer und immer wieder die Computeranimation an – bewusst, und sie verdeutlicht dies insbesondere durch ihre zeitlich verzögerte, betonende Aussage („wenn ich das dann **langsam weiß**“).

Beherrscht sie die räumlichen Anforderungen, dann kann sie „auch **damit** arbeiten (M zeigt auf die Aufgaben auf dem Aufgabenblatt), **dann** kann ich mir das ja selber vorstellen“ und sie benötigt keine weiteren Visualisierungshilfen. Dem fügt sie hinzu:

*„[Mein räumliches Vorstellungsvermögen wird durch die Arbeit mit dem Computer] besser, weil ich seh die ja, muss, muss mir die eigentlich auch merken und wenn ich **mir die die ganze Zeit angucke**, hab ich, weiß ich sie ja irgendwann auch, dann behalte ich sie ja auch im Kopf. [Und] wenn **man das lange genug gemacht hat** und das **irgendwann auch verstanden hat**, dann reicht auch das Papier.“*

Der algorithmische Charakter der Computeranimationen ermöglicht ihr, ihren Bedürfnissen entsprechend „*langsam da rein zu kommen*“: Durch die Möglichkeit der exakt wiederholbaren Faltreihenfolge kann sie sich diese „*die ganze Zeit*, immer wieder und *lange genug angucken*, bis sie es *irgendwann verstanden hat*“.

Nach der Arbeit mit der Animation kann sie aus der Perspektive des Beobachtens in die Rolle der konkret handelnd-reflektierten Akteurin eintreten, welche zielgerichtet eigene Handlungen simultan durchführt und beobachtet.

Dies zeigte sich bereits an ihrem Verhalten während der Unterrichtseinheit (die sich stringent abwechselnden Arbeitsphasen mit den Computeranimationen und den ausgeschnittenen Materialnetzen) und spiegelt sich zudem an ihrer reflektierten Sichtweise auf diese beiden Medien wieder, die sie in dem folgenden Interviewausschnitt äußert. Dabei ging es um die Frage, welchen Stellenwert sie den ausgeschnittenen Materialnetzen im Vergleich zu den Computeranimationen für ihr Lernen beimisst, *nachdem* sie bereits mit den Computeranimationen gearbeitet hat.

Interviewer: „Was findeste da [im Sinne von dann] **wichtiger**? Den Computer oder das Material?“

Michi: „Das **Material**.“

Interviewer: „Und wieso findeste das Material da wichtiger?“

Michi: „Das, **das kann ich mir selber zusammenbauen** und **hier** (M zeigt auf den Computer) **macht der das ja eigentlich selber für mich** und da kann ich ja (M zieht die Schultern leicht hoch) nicht mehr so viel - und wenn ich das auf äh, mit Material lerne ich ja **dann eigentlich noch mehr dazu**.“

Interviewer: „Als mit ´m Computer?“

Michi: „Da (M zeigt auf den Computer) baut der das für mich und stellt das für mich her und das Material, da muss ich **selber herstellen** und überlegen und hier (M zeigt auf den Computer) gibt der mir das schon, das Material, muss nur noch gucken, ob das jetzt’n Würfelnetz ist oder nicht. Beim Material muss ich **selber gucken**.“

Haben die Computeranimationen ihren Zweck als Ideengeber und Visualisierer erfüllt, indem sie Michi zusätzlich zu ihrer Binnenperspektive die Außenperspektive ermöglichen, so treten sie mit all ihren Nachteilen (durch die fehlenden Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten der Benutzersteuerung) in den Hintergrund.

Insgesamt zeigt sich hier der Expertise Reversal Effect: Die zunächst hilfreiche Gestaltung der Lernumgebung wird überflüssig, da sich durch die fehlenden Möglichkeiten der Benutzersteuerung das Instruktionsdesign der Computeranimationen nicht dem steigenden Niveau des Lerners anpassen lässt.

Diesen Perspektivwechsel – den Nutzen und die Bewertung der beiden Medien für unterschiedliche Phasen im Lernprozess – nimmt auch Michi vor. Dies verdeutlicht sich anhand ihrer gestisch, mimisch und verbal sehr unterschiedlich betonten Aussagen zu der Vorstellungsarbeit, die der Computer für sie ausübt: Während ihr zu Beginn ihres Lernprozesses die Computeranimationen „*am meisten geholfen*“ haben,

*„Da (M zeigt auf den Computer) stellt der das eigentlich für **mich** vor (M fasst sich dabei mit beiden Händen vom Computer zum Kopf). Hier (M zeigt auf den Computer) kann ich meine Anfangsschritte machen am Computer, dass ich da rein komme, dass ich's weiß, wie es funktioniert ...“*

verändert sich dieser Stellenwert des Computers zu einer überflüssiger werdenden, für konkrete Eigenaktivitäten hinderlichen Hilfe, nachdem Michi in der Lage ist, zielgerichtet eigene Handlungen simultan durchführen und beobachten zu können.

*„Und hier (M zeigt auf den Computer) **macht der das ja eigentlich selber für mich** und da kann ich ja (M zieht die Schultern leicht hoch) nicht mehr so viel ... und hier (M zeigt auf den Computer) gibt der mir das schon, das Material, muss nur noch gucken ob das jetzt'n Würfelnetz ist oder nicht.“*

Ihre sinngemäß identische Teilaussage bekommt nun einen deutlich anderen Zungenschlag. Achselzuckend unterstreicht sie, dass sie mit den Computeranimationen „ja nicht mehr so viel“ machen kann. Außerhalb der eingeschränkten Möglichkeiten zur Benutzersteuerung kann sie nicht aktiv eingreifen, um Flächen beliebig umzusetzen, Teilkloppungen durchzuführen, Faltreihenfolgen, -geschwindigkeiten und Pausen im Faltprozess zu bestimmen – sie hat kaum individuelle Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten, „der Computer gibt ihr das schon, das Material“, und daran kann sie nichts ändern. Dies führt zu einer fehlenden Passung zwischen dem Instruktionsdesign der Computeranimationen und der bereits erzielten Expertise des Lernenden.

Jetzt muss sie „nur noch gucken, ob das jetzt'n Würfelnetz ist oder nicht“, während sie zu Beginn ihres Lernprozesses durch die Computeranimationen Unterstützung bei ihren Anfangsschritten erhalten hat. Diese Anfangsschritte sind nun getan, und sie kann ohne Hilfe "eigenständig gehen".

Das Material nimmt daher jetzt den wichtigsten Stellenwert in ihrem weiteren Lernprozess ein – „**das kann ich mir selber zusammenbauen, [...] mit Material lerne ich ja dann eigentlich noch mehr dazu**“, da sie hiermit ihre lernerangepassten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten bei der simultanen Durchführung und Beobachtung ihrer eigenen Handlung nutzen kann. Hier kann sie dann „**selber herstellen und überlegen**“, da sie mittlerweile in der Lage dazu ist.

Die charakteristischen Eigenschaften des Materials, die noch zu Beginn von Michis Lernprozess eine fehlende Passung verursacht und so zu einer Überforderung ge-

führt haben, ermöglichen ihr nun aufgrund ihres erzielten Niveaus lernerangepasste Vorgehensweisen zur (Weiter-) Entwicklung mentaler Repräsentationen.

Insgesamt wird deutlich, dass Michi ihre Medienbewertungen sehr bewusst im Hinblick auf eine lernerspezifische Passung für ihren Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen vornimmt. Dabei erachtet sie die beiden folgenden Aspekte als zentral:

- Welche Hilfen werden dir durch das jeweilige Medium geboten (visueller Ideeengeber, dynamischer Visualisierer, Struktur, Überblick, Orientierung)?
- Kannst du selber falten (individuelle Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten: Faltreihenfolgen; -geschwindigkeiten, Teilkklappungen, Pausen)?

Diese von einer lernphasenspezifischen Lernerangepasstheit abhängige Bedeutung des jeweiligen Mediums spiegelt sich auch an Michis Äußerung zu einer rückversichernden Kontrollfrage bzgl. des Medieneinsatzes wieder:

*„Wenn ich das **mit dem Computer nicht verstehen kann**, wenn ich **dem ... nicht folgen kann**, würde ich erst da mit [M zeigt auf das Material] arbeiten.“*

Kann sie dem visuell vorgegebenen, nicht beeinflussbaren Handlungsablauf „**nicht folgen**“, weil bspw. die Animationsgeschwindigkeit oder der Komplexitätsgrad zu hoch ist, und ist deswegen auch durch wiederholtes Ablaufen-Lassen der Animation für sie kein Zugang zur Beobachtung und Analyse und damit zum Verstehen möglich, so entfällt für Michi die unterstützende Funktion der Computeranimationen.

Aufgrund des lernerspezifisch ungeeigneten Instruktionsdesigns dieses Mediums und der dadurch erzeugten fehlenden Passung greift Michi auf das Material zurück, auch wenn sie evtl. durch die kognitiven Mehranforderungen des "simultanen Handelns und Beobachtens" überfordert sein könnte. Mit diesem Medium hat sie im Gegensatz zu den Computeranimationen jetzt zumindest die *Möglichkeit*, Einfluss auf die Handlung zu nehmen, um eine Passung evtl. doch herstellen zu können.

Hat sie selbst diese Möglichkeit des Rückgriffs nicht, so verdeutlicht sie in dem folgenden Interviewausschnitt mit ihren betonten und zeitlich verzögerten Aussagen insbesondere die Langsamkeit ihres Lernens und implizit die damit verbundenen hohen kognitiven (Mehr-) Anforderungen, die an sie gestellt werden. Im Folgenden geht Michi davon aus, dass sie zuerst mit Aufgabenstellungen auf Papier arbeiten *muss*:

*„Wenn man das zuerst macht, erst hinterher mit dem Computer arbeitet, dann **muss** man sich das erst **ganz** [zeitlich verzögerte Aussprache] vorstellen, dann muss man das **lang---sam** [zeitlich sehr verzögerte Aussprache] aufbauen wenn man da noch nie vorher mit gearbeitet hat, und dann das (M zeigt auf das Blatt Papier) macht, dann ist das schon schwierig. Und wenn man dann hinterher hier (M zeigt auf Computer), dann da mit (M zeigt auf die Papier-Sets) und dann da mit (M zeigt auf Papier), dann ist das leicht, eigentlich.“*

Musst du dir eine unbekannte räumliche Anforderung mental modellieren, zu der du noch keine Vorstellung aufgebaut hast, so musst du es dir „**ganz**“ vorstellen. Mit Blick auf Michis Lernerfahrungen wird ersichtlich, dass sie mit ihrer betont und zeitlich verzögerten Aussage „**ganz**“ dem Interviewer zu erklären versucht, dass sie bei ihrer Vorstellungsarbeit keine *äußere* und *innere* Unterstützung erhalten kann und diese selber leisten muss. Dadurch, dass sie allein auf ihren Kopf verwiesen ist und ihr der visuelle Ideengeber und dynamische Visualisierer fehlt, geht es bei ihr nur sehr „**lang---sam**“, und es ist für sie *schwierig, ihre Anfangsschritte zu machen und da rein zu kommen*.

Zum Sammeln dynamisch-räumlicher Bilderfahrungen und zur Ausbildung mentaler Repräsentationen fehlt ihr die unterstützende Außenperspektive und damit Struktur, Überblick und Orientierung. Mit der Art und Weise ihrer verbalen Artikulation scheint sie – dem eigenen Lernen nachempfunden – die Schwierigkeiten zum Ausdruck bringen zu wollen, die sie mit diesen kognitiven (Mehr-) Anforderungen hat.

In den voranstehenden Ausführungen konnte an dem Fallbeispiel "Michi" bisher herausgearbeitet werden, worin der *äußere* unterstützende Einfluss der Computeranimationen *für* mentale Modellierungsprozesse bestehen kann.

Dass Computeranimationen auch eine *innere* Unterstützung *während* mentaler Modellierungsprozesse bieten können, soll an dieser Stelle exemplarisch verdeutlicht werden.

Michi musste in dieser Phase rein mental die auf Papier dargebotenen Aufgabenstellungen bearbeiten. Ein Rückgriff auf die Computeranimationen war nicht möglich. Anhand ihrer verbalen Beschreibungen wird jedoch die unterstützende Funktion der Computeranimationen *während* ihres mentalen Simulationsprozesses ganz deutlich:

Michi: „So liegt der [das Netz] da und so (M deutet den nicht sehbaren Faltprozess mit ihren Fingern an) wird der langsam hochgeklappt. Nur, dass man nicht sieht, wie .. wie er hochgeklappt wird.“

Interviewer: „Stellst du dir das vor?“

Michi: „Ja, langsam aber nur. Disch ..(Michi deutet hiermit verbal den nicht sehbaren Faltprozess an). Man sieht ihn [das Netz], dann wird das [die Flächen] ... **wie jetzt vom Computer ganz langsam hochgeklappt**, und dann ist das [die Flächen] hier (M zeigt darauf) schon ein bisschen weiter [gefaltet] und hier (M zeigt darauf) ist es dann ganz weit. Und dann müsst nur das Bild kommen, wo er ganz ist.“

Tatsächlich arbeitet Michi gar nicht am Computer. Dennoch nutzt sie die Analogie der dynamischen Computervisualisierung, um den äußerlich nicht sichtbaren Faltprozess vom Netz zum Körper zu beschreiben. Ihre verbalen Beschreibungen legen nahe, dass sie durch mental transformierte Computeranimationen – verstanden als innere Abbilder der äußeren Prozesse – eine *innere* Unterstützung *während* ihres mentalen Modellierungsprozesses erfahren hat.

Das Fallbeispiel "Michi" – kognitionspsychologische Deutung

Am Fallbeispiel "Michi" zeigt sich die "facilitating function" von Animationen (Schnotz & Rasch 2008). Durch die explizite Darstellung der dynamischen Prozesse wird Michi eine *äußere* Unterstützung in Form von Struktur, Überblick und Orientierung *für* entsprechende mentale Modellierungsprozesse geboten. Dadurch findet sie einen Zugang zu lernrelevanten Beobachtungs- und Analyse-Prozessen.

Mit dieser Art und Weise der *äußeren* Unterstützung verdeutlicht sich weiterführend der "Worked Example Effect" (Chi, Glaser & Rees 1983; Reimann 1997; Renkl 2002, 2005): Die Demonstration der kontinuierlichen Handlungsabläufe veranschaulicht unmittelbar die Problemlösung sowie die dynamischen Beziehungen zwischen den in der Animation enthaltenen Elementen. Hierdurch entfallen für Michi die üblichen nicht zielführenden Suchprozesse nach der Problemlösung sowie das In-Beziehung-Setzen einzelner Sinneinheiten als zusätzliche mentale Anstrengung. Dadurch kann sie sich allein auf die dargebotene Problemlösung konzentrieren.

Lernende wie Michi, die durch das "simultane Durchführen und Beobachten einer eigenen Handlung" überfordert sind, können in hohem Maße von der "facilitating function" von "Worked Examples" profitieren. Die kognitiven Mehranforderungen, die mit der Planung und Durchführung der Handlung sowie der Suche nach der Problemlösung verbunden sind, werden durch die Worked Examples ersetzt. Dadurch stehen den Lernenden umfangreichere Arbeitsgedächtniskapazitäten zur Verfügung.

Der "Worked Example Effect" zeigt sich auch im Hinblick auf die *innere* Unterstützung: Michi erinnert sich an Computeranimationen, die sie auf dem Bildschirm gesehen hat, und nutzt diese Erinnerung als *innere* unterstützende Hilfe *während* ihrer mentalen Modellierungsprozesse.

Diese bereits vorliegenden, mental transformierten Computeranimationen lassen sich als ausgebildete Schemata charakterisieren, die „typische Zusammenhänge zwischen Informationseinheiten in einer organisierten Wissensstruktur [repräsentieren]. Sie bilden einerseits Wissen ab, steuern andererseits aber auch den Erwerb neuer Informationen, indem sie helfen, diese zu ordnen und zu organisieren“ (vgl. Niegemann 2008, S. 43).

So können ihr die aus dem Langzeitgedächtnis aktivierten Schemata (die vorgestellten computeranimierten Faltprozesse) eine *innere* mentale Unterstützung *während* der Konstruktion einer dynamischen mentalen Modellierung bieten.

Auf dem Hintergrund der CLT zeigen sich ähnliche Interpretationen:

Zu Beginn ihres Lernprozesses ist Michi mit der zielgerichteten Durchführung und Beobachtung eigener Handlungen überfordert: Aufgrund fehlenden Vorwissens kann sie keine Schemata aus dem Langzeitgedächtnis abrufen, um den Aufbau ihrer Wissensstrukturen zu steuern. Es besteht eine fehlende Passung zwischen ihrer Expertise und dem Instruktionsdesign des Materials.

Diese Situation wird als "Intrinsic- und Extraneous-Overload-Situation" bezeichnet. Durch das Involviert-Sein in die Handlung werden hohe mentale Anforderungen an Michi gestellt: Neben der konkreten Durchführung der Handlung müssen Planungs-, Koordinations- und Synchronisations- sowie Analyse- und Reflexionsprozesse durchgeführt werden. Der Handlungsprozess muss insgesamt an den Beobachtungs- und Denkprozess angepasst werden, damit das Handeln das Beobachten und Denken (unterstützend) begleitet und umgekehrt.

Für Michi ist zielgerichtetes "simultanes Handeln und Beobachten" durch eine hohe Element-Interaktivität gekennzeichnet: Sie muss viele Zusammenhänge zwischen den einzelnen Informations- und Sinneinheiten eigenständig konstruieren. Die einzelnen Einheiten müssen dabei simultan im Arbeitsgedächtnis gehalten und verarbeitet werden, wodurch der "Intrinsic Cognitive Load" und damit die Belastung ihres Ar-

beitsgedächtnisses sehr hoch ist. Diese bei der Informationsaufnahme benötigten umfangreichen kognitiven Ressourcen stehen ihr für den eigentlichen Wissenserwerb nicht mehr zur Verfügung. Dies führt zur Überforderung von Michi bei der Auseinandersetzung mit den Materialnetzen.

Mit Blick auf den "Extraneous Cognitive Load" lässt sich für das Instruktionsdesign der verwendeten Medien "Materialnetze" und "Computeranimationen" festhalten: Simultanes Handeln und Beobachten erfordert das simultane Bereithalten und Integrieren verschiedener Informationen im Arbeitsgedächtnis. Dies ist mental anstrengender als die Verarbeitung bereits vorstrukturierter, integrierter Information, wie sie durch die computeranimierte Darbietung ermöglicht wird.

Durch den Einsatz der als Worked Examples charakterisierbaren Computeranimationen lässt sich der "Extraneous Cognitive Load" reduzieren. Die vorstrukturierte integrierte Information reduziert die Element-Interaktivität und infolge dessen auch den "Intrinsic Cognitive Load". Dadurch stehen Michi bei der Auseinandersetzung mit den Computeranimationen mehr "unbelegte", freie kognitive Ressourcen für den eigentlichen Lernprozess zur Verfügung, wodurch überhaupt erst ein ausreichendes Maß lernförderlicher – Germane Load induzierender – Prozesse bei ihr ablaufen kann und in Folge des erhöhten "Germane Cognitive Load" ihr Wissenserwerb gefördert wird.

In ihrem weiteren Lernprozess führt Michis Expertise dazu, dass die Computeranimationen ihren hilfreichen Stellenwert verlieren. Sie benötigt nun weniger kognitive Ressourcen bei der Auseinandersetzung mit den Materialnetzen und ist zunehmend in der Lage, eigene Handlungen zielgerichtet durchzuführen und zu beobachten. Dies führt zu einer Passung zwischen ihrer Expertise und den Materialnetzen und durch die Entwicklung von Schemata ebenso zu den Aufgabenstellungen auf Papier.

Das Fallbeispiel "Michi" unter der Perspektive des "Integrated Model of Text and Picture Comprehension" (Schnotz 2005):

In diesem Modell wird davon ausgegangen, dass beim Betrachten eines visuellen Bildes bildhafte Informationen über den visuellen Kanal (Augen) aufgenommen und kurzzeitig in dem visuellen sensorischen Register gespeichert werden. Als lernrelevant erachtete Informationen werden über den visuellen Kanal kapazitativ begrenzt selektiert und an das visuelle Arbeitsgedächtnis weitergeleitet. Dort werden die Infor-

mationen als Konfiguration ikonischer Zeichen interpretiert und zusammen mit dem Vorwissen zur direkten Konstruktion eines mentalen Modells des Lerngegenstandes verwendet (vgl. Schnotz, Seufert & Bannert 2001, S. 459; Schnotz 2006a, S. 168).

Durch die kognitiven (Mehr-) Anforderungen bei der simultanen Durchführung und Beobachtung eigener Handlungen ist Michis visuelles sensorisches Register und infolge dessen ihr visueller Kanal überlastet: Sie muss zu viele neue Informationen simultan verarbeiten, deren Lernrelevanz sie aufgrund fehlender Struktur, Orientierung und eines fehlenden Überblicks im Lernprozess nicht kennt. Zudem können aufgrund des fehlenden Vorwissens keine Schemata aus dem Langzeitgedächtnis Entlastung zur Integration der neuen Information im visuellen Arbeitsgedächtnis schaffen.

Insgesamt kann Michi dadurch keine "lauffähigen mentalen Modelle" bei der simultanen Durchführung und Beobachtung eigener Handlungen entwickeln, aus denen propositionale Repräsentationen gebildet werden könnten. Der Interaktionskreislauf zwischen dem jeweils konstruierten mentalen Modell und der jeweils gebildeten propositionalen Repräsentation des Sinngehalts (vgl. auch Schnotz 2006a, S. 168) kommt dadurch erst gar nicht in Gang. Infolge dessen können keine Schemata im Langzeitgedächtnis abgespeichert und in einer erneuten Lernsituation als Vorwissen aktiviert werden, so dass es auch nicht zur Überarbeitung, Weiterentwicklung und Ausschärfung des jeweils aktuellen mentalen Modells sowie der jeweils aktuellen propositionalen Repräsentation im soeben beschriebenen Interaktionskreislauf kommen kann.

Die Computeranimationen hingegen strukturieren durch den visuell vorgegebenen Handlungsablauf die Gesamthandlung und damit die visuellen Informationen. Durch diese vorstrukturierte bildhafte Informationsdarbietung entfallen irrelevante Suchprozesse und die beschriebenen kognitiven (Mehr-) Anforderungen werden ersetzt. Der Aufmerksamkeitsfokus wird gesteuert und auf lernrelevante Informationen gerichtet, wodurch das visuelle Register und der visuelle Kanal nicht überlastet werden. Durch die Außenperspektive bieten die Animationen Überblick und Orientierung bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen. Dadurch findet Michi einen Zugang von der Betrachtung der Computeranimationen zu einer gezielter werdenden Beobachtung und Analyse und *kann* "lauffähige mentale Modelle" entwickeln.

Die "Arbeit im Interaktionskreislauf" kann somit aufgenommen werden. Zudem können die transformierten Animationen die Aufgabe der Schemata aus dem Langzeit-

gedächtnis übernehmen und in erneuten Lernsituationen durch Steuerung, Struktur, Orientierung und Überblick zur zusätzlichen Entlastung des Arbeitsgedächtnisses, insbesondere des visuellen Kanals, beitragen.

4.2.2 Fallbeispiel Johannes

Johannes besitzt einen Laptop und konnte mit Computerspielen, Word und einem Programm zum Schriftlichen Rechnen bereits private Erfahrungen mit dem Computer sammeln. Schulische Erfahrungen mit dem Computer existieren jedoch nicht.

Seiner eigenen Einschätzung nach geht er recht gerne zur Schule, ist dem Fach Mathematik positiv gegenüber eingestellt und hat eher wenig Geometrie- und Raumvorstellungsunterricht erhalten. Das deckt sich auch mit den Aussagen der Lehrerin. Sie beschreibt Johannes als einen interessierten, wissbegierigen und kreativen Schüler, „der viele Fragen stellt und ungewöhnliche Wege geht“, und stuft ihn als einen leistungsstärkeren Schüler ein, der sehr gut in der Klassengemeinschaft integriert ist.

In der Unterrichtseinheit setzt Johannes insbesondere bei Aufgaben, die eine hohe Anzahl mentaler Behaltensprozesse erfordern, immer wieder und vornehmlich ab einem späten Zeitpunkt im Faltprozess seine Hände zur Durchführung von unterstützenden Begleitbewegungen zu mentalen Prozessen ein.

Im Vortest kann er besonders Aufgaben mit einer hohen Anzahl mentaler Behaltensprozesse nicht bearbeiten, im Nachtest löst er alle Aufgaben korrekt. Sein Vorgehen bei der Auseinandersetzung mit den Computeranimationen lässt sich jeweils in den Phasen des Kennenlernens neuer Aufgabentypen, insbesondere bei den Aufgaben mit einer hohen Anzahl mentaler Behaltensprozesse, als "Trial-and-Error-Strategie" – als "hypothesenfreies Zusehen" charakterisieren. Dabei "klickt er an, lässt die Computeranimation ablaufen und sieht erst mal zu, was überhaupt passiert".

„Also, der Computer hat mir Würfelnetze gezeigt, die da [als ebenes Netz] offen lagen, die waren im Kopf für mich unmöglich, ja und dann hab ich einfach mal gedacht, dann machst du sie jetzt zusammenpuzzeln [lässt sie durch die Computeranimation zusammenfallen], also klickst dann richtig. Und dann war's dann, manchmal war's falsch, manchmal war's richtig. Und dann hab ich ja, wo er's [das Netz] dann zusammenhatte, wieder aufgegangen ist [das Netz wurde durch die Computeranimation wieder aufgefaltet], da hab ich gedacht, ja war eigentlich dumm von dir, dass du's nicht gewusst hast, weil 'n bisschen verrät der Computer schon, also der zeigt dir dann Würfelnetze, die eigentlich, ja mir kamen sie unmöglich vor. Ja, aber andererseits waren sie auch wieder richtig.“

Obwohl Johannes den grundsätzlichen Handlungsablauf kennt und in der Lage ist, mentale Modellierungen vorzunehmen, ist es für ihn offensichtlich unmöglich, Netze, die eine hohe Anzahl mentaler Behaltensprozesse erfordern, im Kopf "vollständig" zusammenzufalten. Mit Hilfe seiner "Trial-and-Error-Strategie" lernt er zunehmend, ohne dabei als Akteur der Handlung in die konkrete Handlungsdurchführung involviert zu sein, jeweils die Merkmale der Handlung herauszulesen, die ihm bei seiner mentalen Modellierung Schwierigkeiten bereiten. Als Beobachter der computeranimierten Handlungen arbeitet er dann intensiv analysierend mit dem Anspruch es selber verstehen zu wollen. Im Folgenden geht es um die Frage, welches Medium ihm am meisten geholfen habe, sich die räumlichen Anforderungen vorzustellen.

„Die eigenen Gedanken mehr, weil der Computer, der macht es zwar, aber wenn man's inne Gedanken macht, dann kann man sich sicher sein, dann hat man's auch im Kopf, dann verliert man's nicht so leicht, also [...] dann behält man das.“

Johannes äußert hier sein Vertrauen in seine eigenen Gedanken. Er ist sich zwar bewusst über die Hilfe, die er durch den computeranimierten Handlungsprozess erfahren kann, jedoch weiß er auch, dass die Animationen nur ein Werkzeug zur Bearbeitung seiner Schwierigkeiten sein können. Auf die Frage „Hast du überhaupt etwas davon, wenn du am Computerbildschirm siehst, wie sich die Netze zusammenfalten?“ beschreibt Johannes sehr reflektiert sein eigenes Lernverhalten:

*„Ich finde, das kommt auf die Motivation an. Also, wenn man das nur auf'm Computer macht und sich das gedanklich nicht vorstellt, hat man da, finde ich, nix von, weil du klickst da was an - ach ja, das war jetzt eins - also das ist dann wie Lotto, Glücksspiel. 'N bisschen verrät der Computer schon, also, der zeigt dir dann Würfelnetze, die eigentlich, ja, mir kamen sie unmöglich vor. [...] Der Computer macht dir das jetzt vor und wenn du dann da so'n Würfelnetz da liegen hast [auf dem Bildschirm], dann finde ich, dass das nicht so gut geht [im Kopf], weil der Computer dir viel vorsagt, aber wenn der Computer **dir das zeigt** (J gestikuliert mit seinen Händen und deutet eine Situation an, in der er etwas vor sich beobachten kann) und **du dann** das noch mal auseinandermachst [auf dem Bildschirm] und **dann selber mal zusammenpuzzelst** [im Kopf], dann finde ich, **dann hat man's wirklich auch im Kopf** (J bewegt dabei seine Hände mehrfach zum Kopf).“*

Mit dem Begriff "Motivation" verdeutlicht er die Eigenverantwortlichkeit für sein Lernen und beschreibt zwei Sichtweisen in der Auseinandersetzung mit dem Medium. Dabei unterscheidet er, "ob dir der Computer etwas vorsagt oder etwas zeigt".

"Solange dir der Computer etwas vorsagt", ist sich Johannes bewusst darüber, dass die Animationen zur "mental Passivität" verleiten können – „dann geht es bei ihm

im Kopf nicht so gut“. Es reicht nicht aus, nur durch **Zusehen** die Animationen passiv nachzuvollziehen. Vielmehr ist die gezielte **Beobachtung** der animierten Handlung, die dir der Computer „zeigt“, zur (Weiter-) Entwicklung mentaler Repräsentationen notwendig.

Diese Unterscheidung zwischen „vorsagen“ und „zeigen“ versucht Johannes durch seine Betonung, Gestik und Mimik bei seiner Aussage *„aber wenn der Computer **dir das zeigt** (J gestikuliert mit seinen Händen und deutet eine Situation an, in der er etwas vor sich beobachten kann)“* zum Ausdruck zu bringen und sie durch seine dadurch dargestellte unterschiedliche Anteilnahme und sein unterschiedliches Involviert-Sein in diesen beiden Situationen zu verdeutlichen. Insbesondere durch die mehrfache Bewegung seiner Hände vom Computer zu seinem Kopf versucht er, seinen stark betonten Ausspruch *„dann hat man's wirklich auch im Kopf“* zu unterstreichen und die "Hilfe" für seinen Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen zu verdeutlichen. Diese aussagenunterstreichende Funktion seiner Betonung, Gestik und Mimik zeigt sich auch in dem folgenden Interviewausschnitt:

*„Also, wenn man beim Computer was falsch macht, der zeigt's dir dann, wieso das falsch war und der versucht's dir dann zu erklären, so im Bild versucht der dir dann zu sagen: Johannes, nee der da, darfst du nicht überlappen, das ist kein Würfelnetz, und ja so da versucht er dir's dann zu erklären, zu üben, beizubringen, wie'n Lehrer. [...]. Da hat er mir schon geholfen, würde ich sagen, dass ich dann richtig das Würfelnetz raushatte und nicht irgendwie, ach ja das ist eins, klickst du mal an, sondern da hat er mir **richtig** (J fasst sich mit der Hand mehrmals zum Kopf) **bei geholfen** beim Zusammenpuzzeln, und erst im Kopf und wenn ich dann was falsch gemacht hab, dann wusste ich (J bewegt seine Fäuste "wissend" von sich weg): Ja, das musst du noch mal üben, also das Würfelnetz, dass du das richtig hinbekommst. Und dann, ja, konnte ich auch selber kreieren.“*

In der Rolle des Beobachters vorstrukturierter, animierter Handlungen hebt Johannes die Notwendigkeit des Analysierens und Reflektierens für die (Weiter-) Entwicklung der eigenständigen mentalen Simulationsprozesse hervor.

Interviewer: „Glaubst du, Johannes, dass deine Vorstellungskraft, dass du dir Bewegungen von Würfelnetzen im Kopf vorstellen kannst, dass die durch die Arbeit mit Würfelnetzen am Computerbildschirm besser wird, gleich bleibt, oder vielleicht sogar schlechter wird?“

*Johannes: „Ich finde, das kommt auf die **Motivation** an, wenn ich jetzt, also wenn ich jetzt – oh das ist **langweilig**, also, dass ich dann mir die **nur zusammen- will**, dann wird's meiner Meinung nach schlechter. Aber [...] **ich konnte einige Würfelnetze nicht, und die hat mir der Computer gezeigt, ja geholfen und dann, ja konnte ich auch***

selber kreieren. Also ich finde es kann nur besser werden, weil du weißt mehr Würfelnetze, du kannst wissen, dass du sie drehen kannst, kannst sie so zusammenfalten (J verdeutlicht damit alternative Vorgehensweisen des Faltens), also ich glaube die Ideen kann man dann weiter entwickeln, vergrößern, also weiter bauen.“

Interviewer: „Wo kannst du die denn weiterbauen, die Ideen?“

Johannes: „So, der Computer, der hat Sachen, die waren für mich im Kopf **unvorstellbar**, dass das **überhaupt funktionieren soll** und dann hatte der Computer, wenn jetzt was falsch war [bei mir], konnte ich mir sagen, aha das muss dahin, ok.“

Mit dem Begriff „Selber Kreieren“ betont er das mentale „Weiterentwickeln, Vergrößern und Weiterbauen der Ideen“, die er durch die Arbeit mit den Computeranimationen erhalten hat. Hierbei bekommt Johannes (mehrfach) genau das vor Augen geführt, was er aufgrund der hohen Anzahl von Behaltensprozessen durch eigene mentale Simulationsprozesse noch nicht leisten kann. Dies hilft ihm zunehmend selber zu kreieren und die (zusätzlichen) mentalen Simulationsprozesse durchzuführen.

*Der [Computer] puzzelt's dann zusammen, und wenn was überlappt, dann überlappt es [dann seh ich das] und dann konnte man daraus auch neue Würfelmuster kreieren, also wenn du da jetzt eins hattest, hier z.B. (J zeigt darauf), da überlappten ja die beiden [Flächen] und dann hätte man **das** [die Fläche] z.B. so an **die** Seite setzen müssen, hier dranne und schwup-di-wup war schon wieder ein Neues da.“*

Basierend auf den computeranimierten Visualisierungen der Netze, die sich nicht zu einem Würfel zusammenfalten lassen, schafft sich Johannes eine neue Aufgabenstellung: „Welche Fläche(n) musst du wohin umsetzen, damit aus dem Netz ein Würfelnetz entsteht?“ und betont damit einen weiteren Aspekt des Selber-Kreierens.

Nachfolgend geht es in dem Zusammenhang "der Computer sagt dir etwas vor" und "der Computer zeigt dir etwas" noch einmal um die Bedeutung der computeranimierten Visualisierung für die eigene Raumvorstellungsentwicklung:

Interviewer: „OK, aber es könnte doch jetzt jemand kommen, Johannes, und sagen: Mensch Johannes, dadurch dass du immer das dann am Computerbildschirm siehst, wie das zusammengefaltet wird, dann siehst du ja immer wie das geht, dann musst du ja gar nichts mehr selber bei denken, da wird doch das Vorstellungsvermögen schlechter, oder nicht?“

Johannes: „Das kann man sagen, aber ich, also der Computer puzzelt's zusammen (der zeigt's mir zwar), aber [...] ich finde, wir Kinder haben ja den Ehrgeiz Erster, Bester zu sein und dabei, finde ich, **mussten wir Kinder nachdenken. Wenn ich jetzt Bester sein will, nützt es mir nichts, wenn ich jetzt einfach anklicke** und wenn ich jetzt,

*wenn's mir jetzt egal ist – ist mir egal – anklicken, und Jens und ich haben mit dem Motto gearbeitet „**richtig zu haben**“ [...] und darum haben wir versucht uns das, ja zu, von 100% haben wir uns versucht, **mindestens 66% im Kopf vorzustellen, also, dass der Computer nicht mehr so viel machen musste, weil wir wollten es eigentlich selber machen.**“*

Es scheint, als ob Johannes mit seinen "prozentualen Angaben" zum Ausdruck bringen möchte, dass er bei den Netzen mit einer hohen Anzahl von Behaltensprozessen irgendwann in seinem Vorstellungsprozess keine Orientierung mehr hatte und die mentale Modellierung abbrechen musste. Bis zu diesem Punkt war er in der Lage, eine eigenständige mentale Modellierung vorzunehmen. Ab diesem Punkt erfährt er die orientierende Unterstützung durch die Computeranimationen.

Wieso erfährt Johannes diese unterstützende Funktion zur (Weiter-) Entwicklung seiner mentalen Repräsentationen gerade bei der Auseinandersetzung mit den Computeranimationen, trotzdem, dass auch sein intensiver Einsatz von Begleitbewegungen seiner Hände eine solche Wirkung zunächst vermuten lässt? Ersetzen und visualisieren die Computeranimationen nur das, was zuvor seine Hände (ab diesem Punkt) gemacht haben? Welche Rolle spielen die Begleitbewegungen für Johannes?

Die beiden Hände können bei Begleitbewegungen nur eine ausschnittsweise Materialrepräsentation übernehmen: Zu jedem Zeitpunkt im Faltprozess werden nur zwei Flächen visualisiert, wodurch dieser in Einzelschritte zerlegt werden muss. Hiermit ist eine gewisse Darstellungsflüchtigkeit des gesamten Faltprozesses verbunden. Zudem kommen im Vergleich zu den Computeranimationen die kognitiven (Mehr-) Anforderungen des simultanen Handelns und Beobachtens hinzu.

Die Tatsache, dass man seine Hände im Gegensatz zu dem Computer immer dabei hat, kann auch zur mentalen Passivität verleiten und dazu führen, keine Repräsentationen des "vollständigen" Modellierungsprozesses auszubilden: Werden Begleitbewegungen *systematisch* als *Strategie* für eine lediglich punktuelle Problemlösung im jeweiligen *Arbeitsprozess* eingesetzt, so zieht dies ein dauerhaftes Ersetzen dieser mentalen (Mehr-) Anforderungen nach sich und macht diese äußere Unterstützung grundsätzlich unverzichtbar. Dies scheint bei Johannes der Fall gewesen zu sein.

So können unterstützende Begleitbewegungen einerseits zur Reduktion der kognitiven Anforderungen des mentalen Repräsentierens beitragen oder diese (ab einer

gewissen Stelle im Faltprozess) sogar systematisch ersetzen. Andererseits steigert wiederum der Grad des Involviert-Seins in die Handlungsdurchführung diese Art der kognitiven Anforderungen.

Daher bleibt unklar, ob die Begleitbewegungen (bei Netzen mit einer hohen Anzahl von Behaltensprozessen) eine *nachhaltige* unterstützende Funktion für die (Weiter-) Entwicklung einer mentalen Modellierung der Gesamthandlung (und die Durchführung der zusätzlichen mentalen Simulationsprozesse) bieten oder ob sie eher nur eine punktuelle Unterstützung zur Problemlösung im *Arbeitsprozess* darstellen.

Wie schon bei Michi erscheint die folgende Deutung plausibel: Die Computeranimationen scheinen den *Lernprozess* von Johannes dadurch zu begünstigen, dass er durch die Außenperspektive auf die vollständig dynamisch visualisierte Handlung nicht in die Handlung involviert ist. Er kann ausschließlich beobachten und analysieren, weil die kognitiven Mehranforderungen des simultanen Durchführens und Beobachtens eigener Handlungen entfallen.

Insgesamt lässt sich Johannes' Vorstellungsentwicklung von der „Trial-and Error-Strategie“ zum zielgerichteten mentalen Handeln durch die Entwicklungsschritte „Zusehen – Beobachten / Analysieren – Modellieren – Analysieren – Handeln“ charakterisieren. Bei seinen Medienbewertungen erachtet er folgende Aspekte als zentral:

- Existieren Möglichkeiten zur Exploration, ohne in die Handlung involviert zu sein („Trial-and-Error-Strategie“)?
- Erhalte ich Hilfen für die mentalen Modellierungsprozesse, die mir Schwierigkeiten bereiten (visueller Ideeengeber, dynamischer Visualisierer, Struktur, Überblick, Orientierung)?

Das Fallbeispiel "Johannes" – kognitionspsychologische Deutung

Am Fallbeispiel "Johannes" verdeutlicht sich die "enabling function" von Animationen (Schnotz & Rasch 2008). Erst durch die Animationen bekommt Johannes (mehrfach) genau das *lernwirksam* vor Augen geführt, was er aufgrund der hohen Anzahl von Behaltensprozessen durch eigene mentale Modellierungsprozesse noch nicht leisten kann. Mit Hilfe der Animationen wird er befähigt, zusätzliche kognitive Prozesse auf einer tieferen Verarbeitungsebene auszuüben.

Auf dem Hintergrund der CLT zeigen sich folgende Interpretationen:

Obwohl Johannes grundsätzlich in der Lage ist, mentale Modellierungen vorzunehmen, ist es für ihn nicht möglich, *vollständige* Modellierungen zu Netzen durchzuführen, die eine hohe Anzahl mentaler Behaltensprozesse erfordern. Zur Reduktion und Auslagerung der kognitiven (Mehr-) Anforderungen greift er auf unterstützende Begleitbewegungen mit seinen Händen zurück. Hieran lässt sich sein Umgang mit dieser "Intrinsic-Overload-Situation" erkennen.

Unter der Perspektive des "Integrated Model of Text and Picture Comprehension" (Schnotz 2005) verdeutlicht sich am Fallbeispiel Johannes:

Trotz seiner unterstützenden Begleitbewegungen konnte Johannes noch keine "lauffähigen mentalen Modelle" zu Netzen entwickeln, die eine hohe Anzahl mentaler Behaltensprozesse erfordern. Die visuell dargebotenen Informationen, die er durch seine Begleitbewegungen erhält, kann er nicht so in seine bestehende mentale Modellierung integrieren, dass er daraus ein "lauffähiges mentales Modell" und darauf aufbauend geeignete propositionale Repräsentationen entwickelt. Der Interaktionskreislauf (vgl. Schnotz 2006a, S. 168f; Schnotz 2006b) bricht scheinbar immer wieder an genau den Stellen zusammen, an denen Johannes die unterstützenden Begleitbewegungen mit seinen Händen einsetzen muss. Infolge dessen werden unvollständige kognitive Schemata im Langzeitgedächtnis gespeichert. Werden diese in einer erneuten Lernsituation als Vorwissen aktiviert, so müssen sie jeweils wieder durch die Begleitbewegungen vervollständigt werden. Es scheint, als nähmen die Begleitbewegungen den Stellenwert einer punktuellen Unterstützung zur Problemlösung in Johannes' *Arbeitsprozess* ein, nicht aber den einer nachhaltigen Unterstützung in einem *Lernprozess* zur Weiterentwicklung seiner mentalen Repräsentationen.

Bei der Auseinandersetzung mit den Computeranimationen entfallen die kognitiven (Mehr-) Anforderungen des Involviert-Seins in der Handlung. Im Gegensatz zu den ausschnittsweisen Visualisierungen durch die Begleitbewegungen liefert ihm die faltalgorithmische Darstellung des gesamten dynamischen Prozesses eine *nachhaltige* Unterstützung für seinen *Lernprozess*: Durch gezielte Beobachtung und Analyse kann Johannes die Merkmale der Handlung herausarbeiten, die ihm in seinem mentalen Modellierungsprozess Schwierigkeiten bereiten und dadurch aufbauend auf seinen unvollständigen mentalen Modellierungen "lauffähige mentale Modelle" entwi-

ckeln. So kann er die "Arbeit im Interaktionskreislauf" aufnehmen und zur Weiterentwicklung seiner mentalen Repräsentationen fortführen.

4.2.3 Fallbeispiel Jan

Jan hat bisher einige private und schulische Vorerfahrungen mit dem Computer gesammelt. In einer Computer-AG lernte er das Zehn-Fingerschreibsystem und verfasste Texte mit Word, im Mathematikunterricht wurde ein Computerprogramm zum Üben des Schriftlichen Rechnens im dritten Schuljahr eingesetzt. Jan zeichnet sich durch sein reflektiertes Nachdenken aus:

„Die Schule, würde ich vielleicht die Note 2 oder 3 geben, weil in der Schule – ich geh [bald] auf's Gymnasium – weil, da kann ich das Abitur machen, weil nur somit kann ich Tierforscher werden, besonders für Reptilien, da muss man Biologie, glaube ich für studieren. Und da lern ich auch viel Wissenswertes über Tiere und so im Unterricht, Note 2 oder 3. [...] Mathe, Mathe hat viel mit Denken zu tun, und da würd ich vielleicht ne 4 geben, weil Mathe macht nicht jeder gerne und gehört auch zu Hausaufgaben und das hat auch nicht wirklich viel mit Tieren zu tun, weil alles, was mit Tieren ist, das freut mich sehr, aber Mathe nicht so. [...] Ja, in Mathe bin ich gut, aber heißt ja nicht, dass man's gern macht.“

Seiner Einschätzung nach hat er sehr wenig Raumvorstellungsunterricht bekommen. Im Geometrieunterricht beruhen seine Erfahrungen auf das Arbeiten mit dem Geodreieck. Das deckt sich auch mit den Aussagen der Lehrerin. Sie beschreibt Jan als einen eher zurückhaltenden, sehr reflektierten, leistungsstarken Schüler.

Jan setzt sich während der gesamten Unterrichtseinheit jeweils nur sehr kurz mit den Computeranimationen auseinander. Mit den Worten „das dauert mir immer viel zu lange am Computer“ wendet er sich möglichst bald von den unterschiedlichen Aufgabentypen am Computer ab. Im Gegensatz dazu arbeitet er sehr ausgiebig mit den Aufgaben auf Papier und konstruiert für die Lernkartei der Klasse eigene Aufgabenstellungen. Er bearbeitet alle Aufgaben des informellen Vor- und Nachtests korrekt.

Auf die Frage nach seinen Vorgehensweisen bei der Bearbeitung der Aufgabenstellungen zu den Netzen antwortet er im Interview:

Jan: „Ich wusste die auswendig, weil die sind so oft vorgekommen an der Tafel und auch im Unterricht so fort und dann behält der Kopf das irgendwann. Wenn man nämlich schwierige nimmt, dann muss man erst überlegen, ob das eins wird. Bei dem wusste ich sofort: Das wird eins.“

Interviewer: „Wie überlegst du das denn bei den Schwierigen, ob das eins wird?“

- Jan: „Im Unterricht hatten wir alle Würfelnetze, dann überleg ich mir, die vorzustellen und dann falt ich. [...] Ich stell mir das so vor: Wir hatten an der Tafel ja alle aufgeschrieben und versuch dann: Ich weiß ungefähr, so sieht das aus und versuch mir das dann in der, an der Tafel vorzustellen. Wenn, weil ich weiß, zwei [Quadratflächen] waren noch so und irgendwo waren noch drei, dass ich mir das im Kopf vorstellen kann und dann an der Tafel, dann versuche, mir das so vorzustellen, wie ich das zusammensetzen kann, dass es eins wird.“
- Interviewer: „Faltest du das dann zusammen zu einem Würfel noch, oder nicht?“
- Jan: „Nicht mehr, weil dann weiß ich ja, das ist eins: Wir hatten's an der Tafel, und dann brauch man's ja nicht mehr zusammenfalten, weil wir hatten ja alle an der Tafel, man hat gesehen, dass aus jedem eins wurde.“
- Interviewer: „OK, gut, könnt ja aber auch sein, dass man manchmal welche hat, die keine Würfelnetze sind. [...] Und wie weißt du das dann, ob das 'n Würfelnetz ist oder nicht?“
- Jan: „Dann müsste ich das im Kopf erstmal zusammenklappen. Wenn ich jetzt sehen würde, der hier [J zeigt auf eine Quadratfläche des aufgezeichneten Netzes] würd daran gesetzt werden, würd ich sofort sehen, der überlappt mit dem, oder der hier würd mit dem hier überklappen [J zeigt jeweils auf die betreffenden Quadratflächen]. Das sieht man bei manchen, die einfach, aus einfachen Würfelnetzen noch einen drangehangen wurde oder so, dann sieht man sofort der würd überklappen oder bei Schwierigen, klapp ich die erst im Kopf zusammen und dann merk ich: Das wird keins, das überlappt irgendwo.“ [...]
- Interviewer: „OK, das hast du jetzt gar nicht mehr im Kopf geklappt und das hast du auswendig gewusst?“
- Jan: „Nein, Sie hatten mir das [Netz] irgendwie so gegeben, dann kam mir das'n bisschen komisch vor, hab's dann noch 'n bisschen gespiegelt und so, und dann hab ich gesehen, aha das ist eins, weil wenn man das irgendwie komisch in die Hand gedrückt kriegt, weiß man nie sofort, ob das ein Würfelnetz ist, dann spiegelt man das am Besten so, wie man das in Erinnerung hat.“
- Interviewer: „Und dann brauchst du es nicht mehr im Kopf falten, oder?“
- Jan: „Ja, weil wenn man es komisch irgendwie hat, und man weiß nicht genau ob das eins ist, und das erst zusammenzufalten, kann man auch erst mal kurz spiegeln irgendwie und dann weiß man, das hatten wir an der Tafel und: Das ist eins.“
- Interviewer: „Also wann würdest du eigentlich nur im Kopf falten?“
- Jan: „Ich würde im Kopf falten, wenn ich mir überhaupt nicht sicher bin, ob das eins ist und wenn ich weiß, das wird eins, dann kann ich sofort das am Computer anklicken, und wenn's mir komisch vorkommt, dann klappe ich erst im Kopf zusammen und dann sehe ich ja, ob das eins wird oder nicht und kann dann das richtige klappen. Man kann am Computer auch drehen und spiegeln, das ist auch ne kleine Hilfe und wenn man das dann, wenn der Computer das komisch dahinlegt, kann man sich das so spiegeln, wie man's an der Tafel hatte.“

Jan hat sich im Rahmen der Unterrichtseinheit sein Referenzmodell "mentale Tafel" verschafft, auf das er sich bei der Bearbeitung der Aufgaben bezieht. Dabei vergleicht er die zu untersuchenden Netze mit denen, die an der Klassentafel waren und

die sich nun auf seiner "mentalen Tafel im Kopf" befinden. Seine Vorgehensweisen charakterisieren sich durch drei für ihn verschiedene Aufgabentypen:

1. „Die Würfelnetze, die an der Klassentafel waren“ hat sich Jan auf seine "innere mentale Tafel" in Form von "elf einzelnen Szenebeschreibungen" "abfotografiert". Zu diesen Objekten hat er die propositionale Repräsentation „das ist ein Würfelnetz“ abgespeichert. Er weiß demzufolge auswendig, dass es Würfelnetze sind, ohne mentale Faltprozesse durchführen zu müssen.
2. Die Netze, die er „komisch“ (in ihrer Lage für ihn ungewohnt) präsentiert bekommt, dreht und spiegelt er zunächst, um sie auf sein Referenzmodell "mentale Tafel" zurückzuführen. Gelingt dieses, so ist er fertig. Ansonsten fährt er wie in 3 beschrieben fort.
3. Die Netze, bei denen Jan sich „überhaupt nicht sicher [ist]“, bei denen also weder durch 1. und 2. eine Entscheidung getroffen werden kann, faltet er mental zusammen.

Während er bei den ersten beiden Vorgehensweisen *letztlich* durch statisch-analoge Vergleiche die vorliegenden Netze als Elemente seiner mentalen Tafel identifizieren kann, muss er bei seiner dynamisch-analogen Vorgehensweise unter Punkt 3 mentale Faltprozesse durchführen. Die Netze, bei denen er die ersten beiden Strategien nutzen kann, empfindet er als „einfach“, die übrigen als „schwierig“.

Diese unterschiedlichen Vorgehensweisen spiegeln sich auch an den deutlich verschiedenen Bearbeitungszeiten der einzelnen Aufgaben wieder.

*„Bei Schwierigen, klapp ich die **erst** im Kopf zusammen **und dann merk ich**: „Das wird keins, das überlappt irgendwo.“* Zeitlich unterscheidet er dabei klar: „Erst klappen und dann merk ich“ – erst jetzt kann er entscheiden, ob das vorliegende Netz ein Würfelnetz ist. Wird sein verwendeter Ausspruch „dann merk ich“ im Kontext von allmählicher Sinneswahrnehmung betrachtet, so verdeutlicht die Allmählichkeit das dynamisch-analoge mentale Vorgehen.

Im Folgenden geht es um die Frage, welches Medium ihm bei seinen Bearbeitungen am meisten geholfen habe, sich die räumlichen Anforderungen vorzustellen:

Interviewer: „[...] Deine eigenen Gedanken, die Würfelnetze auf'm Computer, die Würfelnetze, die ausgeschnitten waren, oder die Würfelnetze auf Papier?“

Jan: „Geholfen zum Zusammenklappen? Meistens mein Gehirn, weil man kann das im Kopf schnell zusammenklappen und dann weiß man, dass das eins ist oder nicht ist. Und am Computer kann man noch mal kontrollieren, und da (J zeigt auf Papier) nicht und da hat das Papier einen kleinen Nachteil, aber sonst ist das alles gleich. Aber wenn man das schon mal durchgenommen hat, das Thema, und alle Würfelnetze hat, kann man sehen, dass auf'm Papier, dass das, wenn man's dreht, dass das so an der Tafel schon mal war und dann ist der Nachteil eigentlich schon fast wieder ausgeglichen.“

Interviewer: „Ok, was ist denn für dich eigentlich am schwierigsten? Würfelnetze auf Papier, ausgeschnittene Würfelnetze, oder die im Computer?“

Jan: „Am schwierigsten finde ich die auf'm Papier, weil die liegen, also die sind draufgezeichnet und man muss die dann lösen und es kommt darauf an, wie sie auf's Papier gezeichnet sind, wenn sie jetzt so'ne Form haben oder so eine (J zeigt auf einige Netze auf Papier), weiß man, so waren die nicht an der Tafel, die waren anders, dann waren die vielleicht gespiegelt, und dann muss man da das ganze Papier erstmal drehen. Im Computer kann ich das mit dem Klick machen (J nimmt die Maus, klickt und dreht das Netz am Bildschirm) und hier kann ich das ganz einfach so zusammenfalten, man kann's auch in der Hand drehen (J faltet das Materialnetz zusammen, dann auseinander und dreht es in der Hand), deshalb finde ich das am schwierigsten (J zeigt auf Würfelnetz auf Papier).“

Interviewer: „[...] Was find'ste denn am leichtesten?“

Jan: „Am leichtesten finde ich das hier (J nimmt das Materialnetz), weil man kann sofort zusammenklappen, ob's eins wird, und das kann beim Computer nicht, weil hier in der Hand (J hält Netz in der Hand) kann man's auch selbst drehen wie man will, kann man das am Computer auch, aber das dauert da 'n bisschen länger zum Zusammenfalten und so, hier kann man's sofort sehen, dass es eins wird.“

Zunächst verdeutlicht Jan sein Vertrauen in seine Gedanken. Er glaubt, die räumlichen Anforderungen, die an ihn gestellt werden, zu beherrschen. Beim Vergleich der Medien "Papier" und "Computer" stellt er im Hinblick auf vorhandene Kontrollmöglichkeiten heraus, dass das Papier „einen kleinen Nachteil besitzt, [da es im Gegensatz zu den Computeranimationen keine Kontrollmöglichkeit bietet]. Wenn man das Thema aber schon durchgenommen hat, ist der Nachteil fast wieder ausgeglichen.“

Hier greift seine eigene Lernbiographie: Er selbst hat sich mit seinem Referenzmodell "mentale Tafel" eine eigene Vergleichs- und Kontrollmöglichkeit zur Aufgabenbearbeitung geschaffen. Kann er ein vorliegendes Netz auf seine "mentale Tafel" zurückführen, so benötigt er keinen mentalen Faltprozess, sondern weiß direkt, dass es ein

Würfelnetz ist. Der kleine Nachteil der fehlenden Kontrollmöglichkeiten auf Papier besteht also nur solange, bis er seine mentale Kontrollmöglichkeit entwickelt hat.

Der Nachteil ist für Jan aber nur „fast wieder ausgeglichen“. Im Falle, dass er ein Netz nicht auf seine "mentale Tafel" zurückführen kann, ist er sich zwar sicher, dass es sich nicht darauf befindet. Er muss nun aber einen mentalen Faltprozess durchführen, um nachzuweisen, ob und warum es sich (nicht) um ein Würfelnetz handelt. Bis auf seine darstellungsflüchtige mentale Modellierung hat er keine weitere, äußere Kontrollmöglichkeit bzgl. der Endlagen einzelner Flächen. So gibt er dann auch an, dass die Netze auf Papier am schwierigsten sind. Auf dem Papier bekommt Jan keine visuellen Hilfen in Form von räumlichen Lagen, Teilkklappungen, Animationen, etc. und hat zudem keine benutzergesteuerten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten. Er muss die einzelnen Flächen mental vom Papier „lösen“ und sie im Falle, dass er die Netze nicht auf seine "mentale Tafel" zurückbeziehen kann, "im Kopf falten".

Am Ende des Interviewausschnitts hebt Jan die benutzergesteuerten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten des Materials im Gegensatz zu den Computeranimationen hervor. Damit bezieht er sich auf erfahrbare Formqualitäten, auf das Experimentieren und die Individualität im Vorgehen mit dem Material gegenüber den anderen Medien sowie auf den Stellenwert des Materials als äußeres Referenzmodell zur Vergleichs- und Kontrollmöglichkeit. Zudem rekuriert er hier im Zusammenhang mit den Computeranimationen zum ersten Mal auf den Faktor Zeit.

„Am Computer ist der Nachteil, da muss man erst warten bis das zusammengefalt ist, und dann auf OK drücken, damit dann erst das neue kommt, beim Papier, da weiß man, das ist eins, abhaken, nächste, das ist keins, und dann das nächste; da kann man das hintereinander machen. [...] Mit Material und Papier und meinen Gedanken schaff ich das eigentlich ganz gut und schneller wie der Computer, weil beim Computer muss der erst zusammenfalten und so, und wenn das nichts wird, muss man erst zurückfalten, neu ausprobieren und im Kopf geht das ganz schnell. Und auf'm Material (J nimmt Netz und faltet) kann man auch sofort sehen, dass das eins wird. Das dauert eine Sekunde, dann hab ich den zusammengeklappt.“

Jan ist längst auf einer Niveaustufe, auf der er die Aufgaben rein mental bearbeiten kann und keine Visualisierungshilfen benötigt. Im Gegensatz zu den Animationen muss er den gesamten Faltvorgang nicht bis zum Ende durchführen. Bei vielen Netzen benötigt er keinen Faltprozess und kann sein mentales Referenzmodell nutzen – die „hakt er ab“. Bei Netzen, die er durch mentales Modellieren bearbeitet, kann er genau so weit fortschreiten, bis er eine Entscheidung "Würfelnetz oder kein Würfel-

netz" trifft. Im Vergleich dazu ist ihm die Animation zu langsam und die Bedienung zu umständlich. Mit seiner mentalen Bearbeitung ist er deutlich schneller, und so empfindet er die Computeranimationen eher als Behinderung denn als Unterstützung.

Aus Blickrichtung der CLT zeigt sich hier der "Expertise Reversal Effect": Da sich durch die fehlenden Möglichkeiten der Benutzersteuerung das Instruktionsdesign der Computeranimationen nicht dem Niveau des Lerners anpassen lässt, erzeugt dieses Design zusätzlichen Extraneous Cognitive Load.

Im Hinblick auf zukünftige, ihm unbekannte räumliche Anforderungen weist er den Computeranimationen allerdings eine Anregungsfunktion zu:

Jan: *„Ich würd den Computer einsetzen, weil dann kann ich das, was eigentlich nicht Sinn der Sache ist, hier die verschiedenen Sachen ausprobieren, um zu sehen, was er dann macht. Dann sehe ich, was für'n Weg er gehen will und was er machen will und dann kann man sich das im Kopf vorstellen. Und da (J schaut und zeigt auf die anderen Medien), so kann man das dann auch bearbeiten.“*

Interviewer: *„Und was würdest du dann als nächstes machen, wenn du am Computer gearbeitet hättest?“*

Jan: *„Als nächstes? – Na, also, wenn ich die Aufgabe dann weiß, würde mir das hier (J zeigt auf Material und Papier) auch wieder reichen, weil wenn man erst am Anfang ist, dauert das wie in der Schule, wenn man 'ne neue Aufgabe lernt, 'ne neue Rechenart, dauert das am Anfang länger, und wenn man es dann kann, geht's dann viel schneller und dann dauert's am Computer wieder länger, weil dann muss er erst zusammenfalten und so was. Dann geht's [...] hiermit (J zeigt auf Papier) schneller.“*

Er würde die Animationen nutzen, um die räumlichen Anforderungen zu verstehen und überhaupt eine Vorstellung davon zu entwickeln, würde sich dann aber wieder möglichst schnell von dem Medium lösen und die Aufgaben rein mental bearbeiten.

In den voranstehenden Interviewausschnitten wird ersichtlich, dass sich Jan, trotz seiner Expertise, immer wieder auch auf das Material bezieht. Letztlich hat er für seine unter Punkt 3 beschriebene darstellungsflüchtige, dynamisch-analoge mentale Vorgehensweise kein *mentales* Referenzmodell und damit keine *mentale* Kontrollmöglichkeit. Das Material hingegen bietet ihm als *äußeres* Referenzmodell zeitlich effektive *äußere* Kontrollmöglichkeiten. Hierdurch kann er den *kleinen Nachteil letztlich ganz ausgleichen* und der Darstellungsflüchtigkeit seiner mentalen Modellierungen entgegenwirken, und so mehr Sicherheit bei seiner Entscheidung erzielen.

Insgesamt betont er hiermit die lernerspezifische Passung des Materials im Gegensatz zu den Computeranimationen und verdeutlicht den vollständig nachteileausgleichenden Stellenwert, den er dem Material als *äußere* Kontrollmöglichkeit für seine darstellungsflüchtigen mentalen Modellierungen beimisst.

Ein weiteres Indiz für diesen Zusammenhang liefert der Faktor Zeit: Während er in dem Assoziationsumfeld seiner Aussagen über seine mentale Arbeit und der Arbeit mit den ausgeschnittenen Netzen die Begriffe *schnell, sofort, kurz, das dauert eine Sekunde etc.* nutzt, verwendet er bei seinen Aussagen zu den Computeranimationen die Begriffe *langsam, das dauert länger, man muss erst warten, etc.*

Insgesamt wird deutlich, dass Jan seine Medienbewertungen sehr bewusst im Hinblick auf eine lernerspezifische Passung vornimmt. Dabei erachtet er die beiden folgenden Aspekte als zentral:

- Zeit: „Kann ich mit dem Medium so schnell arbeiten, wie mit meinem Gehirn?“
- Individuelle Kontrollmöglichkeiten: „Habe ich bei Unsicherheiten individuelle Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten für eine schnelle Kontrolle?“

Das Fallbeispiel "Jan" – kognitionspsychologische Deutung

Jan scheint in seinem Lernfortschritt durch die Computeranimationen eher gehemmt als unterstützt zu werden.

„Animationen sollten nicht verwendet werden, wenn die Lernenden genügend kognitive Voraussetzungen mitbringen, um die mentale Simulation eines dynamischen Prozesses selbständig, also ohne äußere Hilfe zu vollziehen. Andernfalls ist die Gefahr groß, dass die Lernenden in ihrem Fortschritt gehemmt werden, indem ihnen eine Unterstützung angeboten wird, die sie gar nicht mehr benötigen“ (Schnotz 2006a, S. 172).

Eine Erklärung dafür liefert die CLT:

Durch den "Expertise Reversal Effect" nehmen die Computeranimationen in dem Lern- und Arbeitsprozess von Jan sehr früh den Stellenwert einer überflüssigen und zeitlich hindernden Repräsentation ein. Diese fehlende lernerspezifische Passung bzgl. des Mediums führt dazu, dass eine unnötige, nicht lernförderliche Belastung des Arbeitsgedächtnisses in Form von Extraneous Cognitive Load erzeugt wird.

Dadurch, dass sich Jan jeweils sehr früh von den Computeranimationen abwendet und sich bewusst für eine seinen Lernbedürfnissen angepasste Medienwahl entscheidet, widersetzt er sich diesem hemmenden Einfluss. Dank seiner Eigenständigkeit in der Medienwahl wurde sein Lernfortschritt zwar nicht gehemmt, es wird aber deutlich, dass kein zusätzlicher Nutzen der Computeranimationen für Lernende mit hoher mentaler Repräsentationsfähigkeit der räumlichen Anforderungen besteht.

In Abgrenzung zu den anderen Fallbeispielen verdeutlicht sich unter der Perspektive des "Integrated Model of Text and Picture Comprehension" (Schnotz 2005) bei Jan:

Jan hat bereits sehr früh geeignete Schemata gebildet, die er aus dem Langzeitgedächtnis abrufen und in denen er die neue Information integrieren kann. Zudem ist er in der Lage, diese Schemata sehr effektiv zur Bildung und Weiterentwicklung von mentalen Modellen und propositionalen Repräsentationen zu nutzen. Die Computeranimationen liefern hingegen überflüssige, wenn nicht gar störende Informationen für sein visuelles Arbeitsgedächtnis und verzögern sein Tun bei seiner Arbeit in den Interaktionskreisläufen zur Weiterentwicklung der mentalen Repräsentationen.

4.3 Bedingungsfaktoren für und Umgang mit "Cognitive Load"

Der im Rahmen der Cognitive Load Theory beschriebene kognitive Belastungszustand nimmt eine zentrale Rolle bei der Bewältigung von Raumvorstellungsanforderungen ein. Der Gebrauch von Sprache aber auch (bereitgestellte) Unterstützungsmedien versuchen auf den "Cognitive Load" positiven Einfluss zu nehmen.

4.3.1 Sprache und Cognitive Load

Alle Kinder beschreiben bildhafte dynamische Prozesse, wenn sie über ihre mentalen Aktivitäten sprechen. Diese sprachlichen Begleitungen haben zwei Funktionen:

1. Als begleitendes und unterstützendes Selbstgespräch während des mentalen Modellierungsprozesses (lautes Denken).
2. Als Erklärung des Vorgehens nach einer entsprechenden Aufforderung.

Dabei ist es „nicht nur so, dass [der Interviewer] etwas über das Kind lernt, sondern auch das Kind lernt dabei, über die Sache, von der es spricht“ (Wettler 2004, S. 171).

Im Hinblick auf die Bedeutung von Sprache wird nachfolgend zunächst ein weiterer Hintergrund für die Analyse der Untersuchungsergebnisse geschaffen.

Mit seinem Beitrag „Durch reden denken lernen“ bezieht sich der Psychologe Wettler (2004) auf Kleists Schrift „Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden“ und beantwortet die Fragen: „Stimmt es, dass wir durch Sprechen lernen? Und wenn es stimmt: Wie kommt es dazu?“ (ebd., S. 172).

Er betont, dass bei unterschiedlichsten theoretischen Annahmen Übereinstimmung darin besteht, dass die Erkenntnis mit dem Reden kommt und Sprechen „nicht als Ergebnis, sondern als die Ursache für die intendierten Lernprozesse“ gesehen werden kann.

„Es macht [...] wenig Sinn, und es erklärt nichts, die Bildung eines Satzes als eine Übersetzung eines abstrakten Gedankens in eine Wortkette zu beschreiben. [...]. Der Anlass, etwas zu sagen, ist eine Wahrnehmung. [...]. Bewusstwerdung heißt, dass [...] Wahrnehmungen und die durch sie evozierten Assoziationen versprachlicht werden.“ (ebd., S. 175).

Zusammenfassend legt er dar, wie es zu der allmählichen Verfertigung der Gedanken beim Reden kommt: „Zum einen müssen dabei Wahrnehmungen und Erinnerungen kommunizierbaren Kategorien, den Wörtern, zugeordnet werden. Zweitens müssen die Wörter so gesetzt werden, dass sie andere Sätze nicht verletzen. Diese Setzung ist der Satz *und* der Gedanke, den sich der Hörer, aber auch der Sprecher merkt. [...]. So lange wir nicht reden, besteht auch keine Notwendigkeit, aus der Unordnung, die in unserem Kopf herrscht, etwas Ordentliches zu machen. Darum ist es lehrreich zu reden. Der Ordnung stiftende Effekt des Redens ist umso stärker, je mehr Zeit wir uns nehmen, aus möglichen Sätzen Schlussfolgerungen zu ziehen und diese mit unserem Vorwissen in Beziehung zu setzen“ (ebd., S. 177).

Chi et al. (1994, S. 442) stellen in ihren Untersuchungen fest, dass Selbsterklärungen unabhängig von dem Leistungsstand der Lernenden prinzipiell hilfreich sein können. Den Vorzug sehen sie dabei in dem sich entwickelnden Prozess begründet, bei dem Vieles (Fakten, Theorien, Zusammenhänge ...) erst im Laufe des Selbsterklärens geordnet und in Beziehung miteinander gebracht wird (vgl. ebd., S. 472).

Darauf basierend lassen sich die beschriebenen Beobachtungen aus den Interviews interpretieren: In diesem sich entwickelnden Prozess der allmählichen Bewusstwerdung zwischen Wahrnehmung, Denken und Versprachlichung schaffen der Akt des Versprachlichens und die Sprache selbst "Ankerpunkte" und "Strukturierungen" für das (weitere) Denken, für die Kognition und die Denkentwicklung.

Der Sprechende schafft sich unterstützende "Marken", Hilfen in sprachlich(-auditiv)er Form, an denen er sich weiter orientieren kann – ähnlich wie Quaiser-Pohl & Jordan (2004, S. 160) es mit Landmarken zur räumlichen Orientierung beschreiben. Ausgesprochenes ermöglicht ihm Orientierung, Sicherheit und einen Moment der Muße bei der Standortbestimmung des eigenen Denkens sowie für zukünftiges Denken.

Im Rahmen meiner Untersuchungen haben der Akt des Versprachlichens und die Sprache selbst während der mentalen Modellierungsprozesse folgende Funktionen:

- Bereits vorgenommene bzw. erfolgte mentale Raum-Lage-Veränderungen bei den Netzen werden gesichert.
- Aktuelle und bevorstehende mentale Raum-Lage-Veränderungen bei den Netzen werden allmählich bewusst.

Durch die begleitende und erklärende Sprache werden die kognitiven Anforderungen reduziert, indem diese durch beschreibende Quasi-Handlungen des eigenen kognitiven Tuns ausgelagert werden. Mit dieser Deutung lassen sich diese so erzeugten sprachlichen Marken als ausgelagerte und dadurch vergegenständlichte sowie vergegenwärtigte Vorstellungen, insgesamt als sprachliches Abbild der kognitiven Prozesse interpretieren, wodurch diese zumindest partiell beobachtbar werden. Hierin verdeutlicht sich die wechselseitig begleitende und unterstützende Orientierungsfunktion von Sprache und Denken.

Diese Interpretation scheint auch auf die nonverbalen Beobachtungen aus den Interviews plausibel übertragbar zu sein: In vielen Interviews zeigte sich, dass Kinder während ihres mentalen Modellierungsprozesses unterstützende Begleitbewegungen mit den Händen durchführen. Dieses Vorgehen trat sowohl mit als auch ohne ein begleitendes verbales Selbstgespräch auf.

Begleitbewegungen können als nonverbale "Versprachlichungen" einer enaktiv-visuellen Sprache aufgefasst werden, im Sinne eines Selbst"gespräches" unter Rückgriff auf das Vokabular des haptischen Gedächtnisses (vgl. Ausführungen im 1. Kapitel).

Unter dieser spezifischen Sichtweise lässt sich die Bedeutung von Begleitbewegungen entsprechend der obigen Interpretationen beschreiben. Dazu lehne ich mich an die dort verwendeten Sprachfiguren an:

Bewusstwerdung heißt in diesem Zusammenhang, „dass Wahrnehmungen und die durch sie evozierten Assoziationen“ (Wettler 2004, S. 175) in Form von Begleitbewegungen enaktiv-visuell versprachlicht werden.

Gespeicherte Erfahrungen werden aus dem haptischen Gedächtnis abgerufen. Sie ermöglichen sowohl ein enaktives Nachempfinden als auch ein beobachtendes Mitvollziehen im Prozess der allmählichen Bewusstwerdung. Wird der Akt des Versprachlichens und die Sprache selbst als nonverbales Selbstgespräch mit Hilfe von Begleitbewegungen verstanden, so verschaffen diese enaktiv-visuelle "Ankerpunkte" und "Strukturierungen" für das (weitere) Denken: Durch die "versprachlichenden Begleitbewegungen" sorgt der "Sprecher" für eine schrittweise Orientierung seiner selbst im Vorstellungs- und Denkprozess.

Zusammenfassend lässt sich die Bedeutung des verbalen und nonverbalen Selbstgespräches durch zwei Charakteristika beschreiben:

- Auslagerung, Vergegenwärtigung, Vergegenständlichung und dadurch Reduktion der kognitiven Anforderungen (Reduktion des Cognitive Load)
- Unterstützende "Ankerpunkte" und "Strukturierungen" zur Standortbestimmung des eigenen Denkens sowie für das weitere Denken.

Hierbei geht es um eine Auslagerung kognitiver Prozesse im dualistischen Sinn: Einerseits Auslagerung und Abbild dessen, was bis zu diesem Zeitpunkt mental passiert (ist) (Auslagerung der "inneren Beobachtung" des mentalen Modellierungsprozesses). Aber auch Auslagerung dessen, was mental zu leisten *wäre* (Auslagern der kognitiv zu leistenden, aber evtl. noch nicht leistbaren Anforderungen).

4.3.2 Medien und Cognitive Load

Im Rahmen der Interviews zeichnet sich ein deutliches Bild der von den Kindern wahrgenommenen Vor- und Nachteile der verwendeten Medien ab.

Diese Bewertungen können als medienübergreifender Spiegel der von Schnotz & Lowe (2008, S. 352) geforderten Berücksichtigung einer Balance zwischen freien Explorationsmöglichkeiten, individuellen Lernereigenschaften und dem Bereitstellen äußerer Unterstützung aufgefasst werden. Sie greifen diese Aspekte implizit auf und beziehen ebenso Aspekte der Benutzersteuerung und der Flüchtigkeit der Darstellungsart des Lerngegenstandes in die Betrachtungen mit ein.

Die Analyse der Bewertungen ermöglicht Einblicke in Erscheinungsformen kognitiver Belastungen und so steht auch dieses Kapitel unter der Perspektive des Erzeugens bzw. Reduzierens von Cognitive Load.

Material – Die ausgeschnittenen Papiernetze

Als Vorteile des Materials gegenüber den anderen Medien benennen die Schüler die folgenden Punkte:

- Objekt- und Prozesseigenschaften sind haptisch erfahrbar,
- Option der eigentätigen Kontrolle,
- Möglichkeit der individuellen Benutzersteuerung,
- die modale sowie räumliche Variabilität der Betrachterperspektive durch die Dreidimensionalität des Objekts.

Insgesamt lassen sich diese unter dem Aspekt "Reduktion / Vermeidung von Cognitive Load" subsummieren. Einige Schülerzitate sollen die genannten Vorteile verdeutlichen:

*Jan: „Weil man kann's auch **richtig** in der Hand halten und fühlen, das kann man beim Papier und Computer nicht [aufgezeichnete und computeranimierte Netze].“*

Michaela: „Material, das war leicht, weil ich das dann einfach mit der Hand zusammenbauen konnte und gucken, ob das ein Würfelnetz war oder nicht.“

Während Jan auf die haptisch erfahrbaren Objekt- und Prozesseigenschaften verweist, hebt Michaela neben der Eigentätigkeit die Kontrollfunktion mit Hilfe des Mate-

rials hervor. Juliane beschreibt im folgenden Transkriptausschnitt Vorteile gegenüber den Computeranimationen aufgrund lernerangepasster Explorationsmöglichkeiten:

*Juliane: „Material – ja, da kann ich’s ja **schneller aufklappen** und **’n bisschen rumexperimentieren** und das konnt ich **da am Computer nicht**, also da konnt ich **nicht irgendwie selber mit den Händen** rumbasteln. [...] **Hier** (J zeigt auf das Material) kann man das dann auch **richtig** klappen und **erst** noch mal gucken, **selber**, ob das **wirklich** richtig sein kann. Weil, wenn ich jetzt zum Beispiel ein Würfelnetz, das gar keins ist, klappen würde, erstmal so drei Quadrate hochklappen würde, dann wüsste ich ja gleich, die letzten zwei, das geht gar nicht, das kann ich gleich lassen.“*

Neben der Eigentätigkeit spricht sie die selbstbestimmte Wahl von Faltgeschwindigkeiten und Faltreihenfolgen an. Sie muss den gesamten Faltvorgang nicht bis zum Ende durchführen, sondern kann (Denk-) Pausen im Faltprozess zur Beobachtung und Analyse wählen und dadurch genau so weit fortschreiten, bis sie eine Entscheidung "Würfelnetz oder kein Würfelnetz" treffen kann (Möglichkeit des Abbruchs eines Faltprozesses, weil Erkenntnisse gewonnen wurden).

Als einen weiteren Vorteil der Materialnetze betont Johannes mit der Variabilität der Betrachterperspektive die Dreidimensionalität des Objekts:

*Johannes: „Mit den Dingen (Materialnetze), mit denen finde ich’s eigentlich ja am einfachsten, weil du kannst bei diesen Teilen, kannst du dir es eigentlich **besser vorstellen**, find ich.“*

Interviewer: „Was kannst du dir da besser vorstellen?“

Johannes: „Also, ich kann mir jetzt mal irgendwie die Grundplatte ausdenken und dann kann ich mir mal vorstellen mmh, mmh, mmh, mmh (zu seinen verbalen Äußerungen klappt er jeweils eine Fläche konkret) – also ich finde das [Materialnetze] geht etwas einfacher, wie das beides [aufgezeichnete Netze auf Papier und computeranimierte Netze]. [...]. Ja also, man muss sich diesen Würfel [Materialnetz] zusammenfalten und dann muss man denken, das wär’n Globus, also wie’n Globus benutzen“ [er hebt das zusammengefaltete Netz hoch, rotiert und betrachtet es aus unterschiedlichen Perspektiven.]

Neben den explorativen Vorteilen des Materials hebt Johannes die eigenständige Wahl der Grundfläche hervor. Zudem ermöglicht ihm die Dreidimensionalität des Objektes unmittelbar variable Perspektiven auf das Objekt einzunehmen, während er dies bei den anderen Medien mental leisten müsste.

Johannes: „Dieses (nimmt Material) würde ich nehmen, weil hierbei – wie gesagt – kann man es, kann man’s wie’n Globus benutzen, also, alles noch da, kann’s überall hindrehen, darum würd ich das nehmen.“

Im Vergleich zu der Flüchtigkeit einer computeranimierten Darstellung ist bei den Materialnetzen aufgrund der individuellen Benutzersteuerung „alles noch da“. Johannes kann beliebige Faltzustände und -prozesse aus eigenständig gewählten Perspektiven beliebig lange erkunden, analysieren und entsprechende mentale Modellierungen dazu ausbilden. Sein Bewertungsfokus bei der Flüchtigkeit der Darstellung liegt auf dem Aspekt der Visualisierungsdauer eines beliebigen Faltzustandes.

Wird an dieser Stelle das Kriterium der haptisch erfahrbaren Objekt- und Prozesseigenschaften in die Betrachtung mit einbezogen, so wirkt neben diesen benutzergesteuerten Möglichkeiten auch das Involviert-Sein des Lernenden in die Handlung der Darstellungsfluchtigkeit des Mediums entgegen: Das zeigte sich anhand von Lernsituationen, in denen Kinder eine bestimmte Kante / Fläche eines Materialnetzes während des Faltprozesses mit ihren Fingern festhielten, um dadurch die Veränderungen der Raumlage dieser "festgehaltenen" Kante / Fläche "mit-verfolgen" zu können.

Darüber hinaus lassen sich in den Zitaten von Jan, Michaela, Juliane und Johannes Entwicklungen des haptischen Wahrnehmens erkennen. Diese reichen

- von einem hypothesenfreien Handeln mit dem Material, verstanden als eine Art "haptische Ästhetik" im Sinne eines "Komplettieren-Wollens des ebenen Objektes zum räumlichen Zielobjekt – es Zusammenmachen zu wollen" (insbesondere zu beobachten, wenn die Faltkanten der Netze bereits (vor-)gefaltet waren),
- über das bewusster werdende haptische und visuelle Wahrnehmen der (dadurch zielgerichteter werdenden) Handlung durch entsprechende Aufmerksamkeitsfokussierungen,
- bis hin zur bewussten haptischen und visuellen Analyse einer zielgerichtet durchgeführten Handlung zur Weiterentwicklung mentaler Repräsentationen.

Kurz: Der Entwicklungsweg vom hypothesenfreien zum zielgerichteten konkreten Handeln durch Wahrnehmung, Analyse und Interpretation.

Als Nachteile des Materials benennen die Schüler die Flüchtigkeit der Darstellung des Faltprozesses unter dem Blickwinkel der exakt wiederholbaren Faltreihenfolge und die hohen mentalen Anforderungen durch das Involviert-Sein in die Handlung.

Insgesamt lassen sich diese unter dem Aspekt "Erzeugen von Cognitive Load" subsumieren. Einige Schülerzitate sollen die genannten Nachteile verdeutlichen.

Lea-Kathrin sieht in der Flüchtigkeit der Darstellung hinsichtlich der exakten Wiederholung desselben Faltvorganges einen Nachteil bei der Materialrepräsentation:

Lea-Kathrin: „Mir ist der Computer lieber.“

Interviewer: „Wieso?“

*Lea-Kathrin: „Weil da kann man das **mehr** ausprobieren und so. Beim Würfel kann man das zwar auch ausprobieren, aber beim Computer ist das irgendwie besser.“*

Interviewer: „Besser?“

*Lea-Kathrin: „**Da** kann man **auch** wissen, ob das richtig oder falsch ist, weil, wenn man hier mit'm Material arbeitet, da weiß man das nicht so richtig.“*

Bei einer ersten Betrachtung ihrer letzten Aussage ließe sich Lea-Kathrins Perspektive auf die beiden Medien in der Weise interpretieren, dass sie diese nur im Hinblick auf eine mögliche Kontrollfunktion beurteilt. Diese wird jedoch durch beide Medien geboten und trotzdem „*weiß man das beim Material dann nicht so richtig*“.

Das wirft die Frage auf, was sich hinter ihren Begriffen „besser“ und „*mehr ausprobieren mit den Computeranimationen*“ verbergen könnte? Es geht ihr hier nicht um die Kontrollfunktion mit Hilfe der jeweiligen Zielobjekte, sondern vielmehr um eine Form des Verstehens: Sie weiß beim Material dann nicht so richtig, **warum** das „*richtig oder falsch*“ ist. "Ausprobieren" scheint für Lea-Kathrin unterschiedliche Bedeutungen im Kontext der beiden Medien zu haben. Sie hat zwar mehr Möglichkeiten des Ausprobierens mit Material, aufgrund der hohen Flüchtigkeit der Darstellung weiß sie es beim Material dann aber nicht so richtig, warum das so ist. Hier setzt ihr Verständnis des Ausprobierens an: Wenn sie ausprobiert hat und sich ihre Faltabfolge nicht bewusst gemerkt hat, weiß sie zwar, ob das Netz ein Würfelnetz ist, will sie die identische Falthandlung aber erneut durchführen, um zu verstehen, warum das so ist, muss sie sich an ihre Faltabfolge erinnern und falls sie diese vergessen haben sollte, dann fängt sie wieder von vorne an. Durch diese Prozesse der Handlungsplanung und -durchführung entsteht kognitive Mehrbelastung.

Dieses Phänomen, dass eine spezielle Faltabfolge im Anschluss an die Durchführung eines materialbasierten Faltprozesses vergessen wurde, konnte bei vielen Kindern beobachtet werden. Sie gaben an, sich nicht mehr erinnern zu können und verwendeten bei der erneuten Durchführung eine veränderte Faltabfolge.

Im Gegensatz zu einer *erneuten Durchführung des Faltprozesses mit veränderter Faltabfolge* mit Hilfe des Materials kann Lea-Kathrin mit den computeranimierten Faltalgorithmen eine *exakte Wiederholung desselben Faltvorganges* erzeugen.

Durch das wiederholte Ablaufen-Lassen der Computeranimation kann sie dabei – ohne in die Handlung involviert zu sein – als Beobachterin der animierten Handlung den Faltvorgang erkunden, analysieren und entsprechende mentale Modellierungen dazu ausbilden. – Und in ihrem Sinne verstehen, warum das so ist: Sie kann für sich effektiv mehr ausprobieren, da der algorithmische Charakter der Computeranimationen durch die Möglichkeit der Wiederholung der Flüchtigkeit der Darstellung entgegengewirkt. Ihre Perspektive auf die Flüchtigkeit der Darstellung bezieht sich im Gegensatz zu Johannes somit auf den Aspekt der exakt wiederholbaren Faltreihenfolge.

Auch Julianes Ausführungen können in diese Richtung interpretiert werden. Sie hebt das Problem des gleichzeitigen Faltens von Flächen und des simultanen mentalen Mitverfolgens hervor:

Interviewer: „Und am Material?“

*Juliane: „Da könnt ich, wenn ich jetzt, also so langsam falten würde, könnt ich's auch sehen, bis da (J nimmt das Material und faltet). Am Computer, das ist 'n bisschen besser auch zu sehen, wie der das auch **richtig** faltet. **Hier** (mit Material) kann ich das gar nicht so richtig mitverfolgen, weil hier klapp ich zum Beispiel jetzt gleich beide [Flächen] gleichzeitig hoch und der macht das einzeln der Computer.“*

Interviewer: „Und in deinem Kopf. Wie machst du es da?“

Juliane: „Da klapp ich die einzelnen Quadrate auch einzeln hoch. Nacheinander.“

Juliane spricht für ihren Lernprozess eine notwendige Passung zwischen dem Handlungsprozess und dem Beobachtungs- und Denkprozess an: Erfolgt das Handeln losgelöst von der Beobachtung der eigenen Handlung, so ist das Handeln von dem Beobachten und Denken entkoppelt. Dann kann sie „das gar nicht so richtig mitverfolgen“.

Wie kann es zu solch einer Loslösung kommen? Führt Juliane ihre Handlung (die Faltprozesse) zu schnell aus, so entkoppelt sie dadurch ihr Handeln von ihrer Beobachtung und dem Mit-Denken. Sie muss also die Faltgeschwindigkeit bei ihrer Handlungsdurchführung auf ihr Beobachten und Denken abstimmen.

Auch das simultane Falten von Flächen kann zu einer solchen Entkoppelung führen. Mit diesem Aspekt wird das Problem der Aufmerksamkeitsfokussierung bzw. der Aufmerksamkeitsteilung bei der Beobachtung einer Handlung angesprochen, da Juliane bei simultanen Faltprozessen nicht weiß, worauf sie ihre Aufmerksamkeit lenken soll.

Insgesamt muss sie ihren Handlungsprozess an ihren Beobachtungs- und Denkprozess anpassen: Sie muss ihr Handeln mit ihrem Beobachten und Denken hinsichtlich möglicher Faltreihenfolgen koordinieren sowie bezogen auf mögliche Faltgeschwindigkeiten synchronisieren, damit das Handeln das Beobachten und Denken (unterstützend) begleitet und umgekehrt. Dieser wechselseitig unterstützende Zusammenhang von Handeln und Beobachten und Denken lässt sich analog zu den Interpretationen und Ergebnissen einordnen, die zur Verwendung und Bedeutung von Sprache herausgearbeitet wurden.

Wird diese Passung nicht hergestellt oder geht sie verloren, so existieren zwei parallele, voneinander losgelöste Prozesse: Ein konkreter Handlungsprozess und ein Denkprozess. Der Wahrnehmungsprozess – das Beobachten und infolgedessen das Analysieren und Interpretieren der Handlung geht dabei als Bindeglied verloren.

Im Idealfall ist das Denken als mentaler Modellierungsprozess noch auf den Lerngegenstand ausgerichtet (im Vergleich zur Handlung allerdings mit veränderter Faltreihenfolge oder Faltgeschwindigkeit). Im ungünstigen Fall geht auch dieser Bezug zum Handeln und damit das Zielgerichtet-Sein des Denkens verloren.

Als Analogie kann hierzu das "Lesen ohne zu denken" (oder "lesen ohne zu `lesen`") im Gegensatz zum "sinnentnehmenden Lesen" angeführt werden. Wer kennt das nicht, dass eine Seite in einem Buch zu schnell gelesen wurde oder die Gedanken ganz woanders hin abgeschweift sind. In einem derartigen Fall existieren zwei parallele Prozesse, das Denken ist vom Lesen entkoppelt. Die betreffende Seite muss dann noch einmal gelesen und "wahrgenommen" werden – langsamer, mit Konzentration auf den Inhalt und sinnentnehmend, damit das Lesen das Denken begleiten kann und umgekehrt.

Insgesamt werden mit den Passungsproblemen mentale Anforderungen deutlich, die bei der simultanen Durchführung und Beobachtung einer Handlung an einen Lernenden gestellt werden. Neben der Koordination und Synchronisation muss der Lernen-

de mentale Planungsprozesse für einzelne Teilschritte sowie für die Gesamthandlung vollziehen, die Handlung ausführen und zudem sein gesamtes Tun analysieren und reflektieren.

Simultanes Handeln und Beobachten erfordert somit mentale Planungs-, Koordinations- und Synchronisationsprozesse sowie Analyse- und Reflexionsprozesse. Bei der reinen Beobachtung einer (computer-) animierten Handlung entfallen einige dieser mentalen Mehranforderungen. Die Anforderungen der Planung, Strukturierung und Durchführung der Handlung werden durch den Animateur ersetzt. Hierdurch verändern und reduzieren sich auch die Anforderungen der Koordination und Synchronisation: Ohne in die Handlung involviert zu sein, kann Juliane als Beobachterin der (computer-) animierten Handlung den Faltvorgang erkunden, analysieren und entsprechende mentale Modellierungen ausbilden. Da sie den Handlungsprozess nicht steuern muss kann sie es „am Computer besser mitverfolgen“ und die Passung zwischen dem animierten Handlungsprozess sowie ihrem Beobachtungs- und Denkprozess einfacher herstellen.

Zwar bestehen bei einer eigenen Handlungsdurchführung mehr benutzergesteuerte Möglichkeiten, aber dadurch, dass diese Möglichkeiten eben vom Benutzer selbst zu steuern sind, erfordern sie durch die Planung, Strukturierung und Durchführung der Handlung auch zusätzliche mentale Anforderungen.

Bei vorgegebenen (computer-) animierten Handlungen entfallen diese. Die Koordination und Synchronisation besteht darin, das eigene Beobachten und Denken auf die vorgegebene, ablaufende Handlung auszurichten. Geht die Passung dabei verloren, weil bspw. die vorgegebene Faltgeschwindigkeit in der Animation zu hoch ist, so besteht die Möglichkeit zur Wiederholung, um die Passung wieder herzustellen.

Julianes Bemerkung zu den Computeranimationen „der macht das einzeln, der Computer“ beziehen sich offensichtlich auf das Programm „*Matheland*“, da sie hier aufgrund des Nacheinander-Faltens der Flächen die Möglichkeit der Herstellung einer Passung erfüllt sieht. Im Gegensatz dazu scheint für sie keine Passung bei dem Programm „*Mathematikus*“ herstellbar zu sein, weil Flächen simultan gefaltet werden. Dies zeigt sich auch an ihrer Sprachverwendung: Der Begriff des Computers ist für sie in diesem Zusammenhang gleichbedeutend mit dem Nacheinander-Falten und sie benennt vor allem das simultane Falten als Passungsproblem.

Papier – Die aufgezeichneten Netze

Die Bearbeitung der Aufgabenstellungen auf Papier *muss* im Kopf erfolgen. Der Lernende hat nur den Startzustand des zu bearbeitenden Netzes zur Verfügung und es stehen keine medieninhärenten Möglichkeiten der Visualisierung oder Kontrolle zur Verfügung. Bei den beiden anderen Medien hat er hingegen jeweils die Möglichkeit,

- die Aufgabenstellungen zuerst mental zu bearbeiten und das jeweilige Medium im Anschluss zur Kontrolle zu nutzen oder
- den Faltvorgang während einer eigenständig ausgeübten Handlung bzw. einer computeranimierten Handlung zum Aufbau und zur (Weiter-) Entwicklung seiner mentalen Modellierung zu beobachten, den Faltvorgang dann erneut mental zu modellieren und ihn eventuell mit Hilfe des Mediums erneut zu kontrollieren usw.

Im Kapitel 3.3.3 wurden potenzielle Vorgehensweisen der Benutzer sowie Einflussmöglichkeiten der Computeranimationen analysiert und mit Hilfe der beiden folgenden Lernszenarien "A links", "B links" beschrieben. Diese lassen sich auf das Medium "Material" übertragen "A rechts", "B rechts", nicht aber auf die Bearbeitung der aufgezeichneten Netze auf Papier:

Ausgangssituation A: Der Lernende führt eine eigenständige mentale Modellierung durch		
Vorgegebene computerbasierte Aufgabenstellung	(1)	Vorgegebene materialbasierte Aufgabenstellung
Mentale Modellierung des Faltvorganges	(2)	Mentale Modellierung des Faltvorganges
Aktivierung der Animation und visuelle Rückmeldung	(3)	Eigentätige Durchführung der Handlung
Vergleich von computeranimierten und mental modellierten Start- und Endlagen	(4)	Vergleich von handlungsbasierten und mental modellierten Start- und Endlagen durch den Lernenden
Zusätzlich im Falle des Aufbaus einer alternativen Modellierung: Beobachtung des computeranimierten Faltalgorithmus zum Aufbau einer alternativen mentalen Modellierung	(5)	Zusätzlich im Falle des Aufbaus einer alternativen Modellierung: Beobachtung des Handlungsprozesses zum Aufbau einer alternativen mentalen Modellierung

Ausgangssituation B: Der Lernende kann eine eigenständige mentale Modellierung <i>nicht</i> durchführen		
Vorgegebene computerbasierte Aufgabenstellung	(1)	Vorgegebene materialbasierte Aufgabenstellung
„Trial- and Error“-Vorgehen	(2)	„Trial- and Error“-Vorgehen
Aktivierung der Animation und visuelle Rückmeldung	(3)	Eigentätige Durchführung der Handlung
Beobachten des computeranimierten Faltvorganges zum Aufbau einer eigenständigen mentalen Modellierung	(4)	Beobachten der Handlung (des Faltvorganges) zum Aufbau einer eigenständigen mentalen Modellierung

Abbildung 22: Lernszenarien A und B im Zusammenhang mit den Medien "Computer" und "Material"

Zusammenfassend: Die material- und computerbasierten Aufgaben *können*, die Aufgaben auf Papier *müssen* mental bearbeitet werden. Diese Eigenschaften wurden von den Kindern erkannt, benannt und auf Vor- und Nachteile bewertet:

Beispiel Juliane:

„Am **meisten** [lerne ich] eigentlich da (J zeigt auf die Aufgaben auf Papier), weil **da muss man das** ja schon **richtig kniffeln** und da, wenn ich dann weiß – oh, das ist richtig – da bin ich auch stolz drauf, weil ich, weil das kann ja auch nicht jeder, das einfach so schnell zusammenzufalten. [...] Auf'm Papier ist das so, da kann ich mir das nur vor Augen, oder im Kopf vorstellen, weil da kann ich ja nicht irgendwie kippen [...]. Nachteile hat's auf'm Papier, dass man nicht irgendwie sehen kann, **wie's denn aussieht**, wenn ich's **richtig** gefaltet hab. Also bei mir im Kopf ist das so: Ich seh's noch nicht mal ne Sekunde und da ist das wieder auseinander. [...] Im Kopf sehe ich das nur so einzelne Schritte.“

Beispiel Michi:

„Da (M zeigt auf die Aufgaben auf Papier) **muss ich mir das selber** vorstellen. Und da (M zeigt auf den Computer) stellt der das eigentlich **für mich** vor (M fasst sich dabei mit beiden Händen zum Kopf).“

Beispiel Helena:

Helena: „Am Computer, da kannst du testen ob das richtig war und wenn du es im Kopf machst, dann kannst du dir nur überlegen, ob das wirklich richtig war. Und da (H zeigt auf die Materialnetze) kannst du es eben ausprobieren. Ich finde auf'm Blatt hat man manchmal bessere Vorteile weil, da kannst du wirklich, da lernst du dann mehr als wenn du immer am Computer.“

Interviewer: „Mmh, wieso lernst du denn da mehr?“

Helena: „Weil du das dann im Kopf machen **musst** und das denkst du dir dann selber und da arbeitest du **wirklich**. Und am Computer da kannst du das immer ausprobieren und da arbeitet der Computer schon selber.“

Beispiel Johannes:

Johannes: „Hier (J zeigt auf die Netze auf Papier) kann man sich das nicht ganz gut vorstellen, **weil ich finde es immer schwer vom Papier abzubekommen** (J macht Begleitbewegungen mit den Händen).

Interviewer: „Wo bekommst du das denn hin, wenn du das vom Papier abbekommst?“

Johannes: „Na dann hab ich's [im Kopf] zusammen.“

Insgesamt lassen sich die Bewertungen auf den folgenden gemeinsamen Nenner bringen: Weil die aufgezeichneten Netze keine Rückgriffsmöglichkeiten und Hilfen zur Visualisierung und Kontrolle bieten, ist das mentale Modellieren ohne jegliche Hilfen am schwierigsten und das räumliche Vorstellungsvermögen wird am meisten gefordert. Der Lernende ist "allein auf seinen Kopf angewiesen":

„Ich muss mir das selber vorstellen, da arbeite ich wirklich und keiner stellt es für mich vor. Da lernst du dann mehr.“ Aber es ist auch „schwer, die Flächen vom Papier zu lösen und abzubekommen“, „man kann es nicht irgendwie sehen, wie's denn aussieht, wenn es richtig gefaltet wäre, man kann nur so einzelne Schritte im Kopf sehen, noch nicht mal ne Sekunde und dann ist das wieder auseinander.“

Die fehlenden Visualisierungsmöglichkeiten und Hilfen werden für das eigene Lernen zugleich als Vor- und Nachteil gesehen. Die Bewertungen geben wieder, an welcher Stelle der Lernende im Lernprozess bei der Auseinandersetzung mit diesem Medium steht – ob er in der Lage ist, geeignete mentale Modellierungen zu dem Lerngegenstand eigenständig zu bilden oder nicht. Letzlich berührt das wiederum die Frage, ob erhöhtes Cognitive Load erzeugt wird oder nicht.

Computer – Die computeranimierten Netze

Insgesamt zeichnen sich durch die Schülerbewertungen die folgenden, im Wechselwirkungszusammenhang stehenden Aspekte als zentral ab.

- Die faltalgorithmische computeranimierte Darstellung,
- Der Computer als dynamischer Visualisierer und visueller Ideengeber mit Anregungsfunktion und der Möglichkeit der (eingeschränkten) Kontrolle,
- Die Passung zwischen computeranimierter Darstellung und mentaler Modellierung / Medieneinsatz – Loslösung vom Computer,

- Der Grad des Involviert-Seins des Lernenden in die Handlung.

Da den beiden letzten Punkten ein übergeordneter Stellenwert zukommt, werden Ausführungen dazu in dem Kapitel 4.4.1 erfolgen.

Mit dem Aspekt "faltalgorithmische computeranimierte Darstellung" verbinden sich unter dem Fokus der Darstellungsflüchtigkeit zwei unterschiedliche Sichtweisen, die sich bereits bei den Analysen zur Materialbewertung herauskristallisierten: „Weil ich das ja auch immer wieder angucken kann“ – vs. – „Alles nicht mehr da“. In Ergänzung seien dazu die folgenden Interviewausschnitte angeführt:

Beispiel Mareike:

Interviewer: „Was hat dir am meisten geholfen?“

Mareike: „Der Computer, weil der hat das zusammengeklappt [...]. Weil ich das ja auch **immer wieder angucken kann** und ... dann vergisst man das auch nicht so schnell, dass man das auch ähm vorstellt, **wie man das eigentlich vorstellt.**“

Beispiel Johannes:

„Ja, [...] dieses (J zeigt auf das Materialnetz) kann man wie'n Globus benutzen. Und den Computer, also das kann man zwar auch beliebig drehen, aber da vergisst man, also jetzt hab ich da den Deckel und da die Grundplatte (J zeigt jeweils am Bildschirm darauf), aber da vergisst man schnell, **welche Seitenwand war das, war die da oder war die da, also da vergisst man**, finde ich, das schneller. Und hierbei (J zeigt auf das Materialnetz) kannst du die Grundplatte, also, wenn das jetzt mein Boden ist, ist da der Deckel (J zeigt im Materialnetz jeweils darauf), da finde ich, kannst du dir sagen, aha das muss neben dem Deckel sein.

Insgesamt lässt sich festhalten: Die Möglichkeit der exakt wiederholbaren Visualisierung *desselben Faltvorganges* (Faltreihenfolge) wirkt der Flüchtigkeit der computeranimierten Darstellung entgegen, reduziert dadurch die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses des Lernenden und eignet sich vor allem zur (Erst-) Entwicklung (alternativer) mentaler Modellierungen. Da die Visualisierungsdauer eines Faltzustandes durch die jeweilige Animation unveränderbar vorgegeben ist, besteht darauf bezogen erhöhte Darstellungsflüchtigkeit und kognitive Belastung. Hierdurch kann die Entwicklung (alternativer) mentaler Modellierungen erschwert werden.

Die hohe Darstellungsflüchtigkeit resultiert aus den fehlenden Möglichkeiten der Benutzersteuerung – vor allem während des Animationsprozesses – und besteht für einige Kinder trotz der Option des wiederholten Ablaufen-Lassens der Computeranimationen.

Insbesondere das Fehlen geeigneter benutzergesteuerter Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten erzeugt unnötiges extraneous cognitive load und wird von den Kindern als zentrale Ursache von Nachteilen der faltalgorithmischen Computeranimationen bewertet. Die folgende Zusammenstellung von Schülerzitataten gibt einen Überblick über relevante Teilaspekte:

- *„Der Computer dreht das immer nur in eine Richtung“ (Johannes)* – "Immer der gleiche Faltprozess, immer aus der gleichen Betrachterperspektive dargestellt": Durch den algorithmischen Charakter bedingt, wird in beiden Programmen jeweils nur eine mögliche Faltreihenfolge eines Netzes aus nur einer Betrachterperspektive dargestellt. Daraus resultiert die Begrenztheit der animierten Lösungsvorschläge sowie die Begrenztheit der Bildschirmdarstellung. Wünschenswert wäre hier (auch aus Sicht der Lernenden) die Möglichkeit der Visualisierung einer Lösungsvielfalt mit Hilfe der Computeranimationen.
- *„Nicht langsamer falten, nicht schneller falten, da muss man erst warten, bis das zusammengefaltet ist“ (Jan)* – Der Benutzer hat in beiden Programmen keine Möglichkeit Faltreihenfolgen, Faltgeschwindigkeiten oder Pausen eigenständig zu wählen sowie den Faltprozess aufgrund von Erkenntnissen abbrechen. In diesem Zusammenhang wurde ebenso das Fehlen von Eigentätigkeit und das Fehlen von haptisch erfahrbaren Objekt- und Prozesseigenschaften (Form-, Klapp-, Prozess- und Pass-Erfahrungen) benannt.
- *„Hat der ne Macke der Computer?“ (Johannes)* – Am Beispiel des Transkriptausschnittes von Johannes soll der Umgang des Programms *„Mathematikus“* mit den in Abb. 14, S. 86 dargestellten "Problemfällen" aufgezeigt werden:

Johannes: „Also, wenn ich mir das im Kopf vorstelle, dann erkenn ich das besser, z.B. wir hatten ja in der Klasse gesagt, vier Puzzleteile (vier zusammenhängende Quadratflächen) kann ich nicht zusammenpuzzeln und wenn, dann kann man das ja mal, dann hab ich das auch im Kopf versucht. Warum geht das denn nicht, das kann ja jeder behaupten, ne? Ja, und dann hab ich, bin ich auch darauf gekommen, warum das nicht ging.“

Interviewer: „Wieso ging das nicht?“

Johannes: „Weil ich kann, also ja vier Teile, das sind die vier Teile (er visualisiert mit seinen Händen die vier Quadratflächen und deutet die möglichen Klappbewegungen an) kann ich nur so klappen oder so klappen. Und dann hätte ich die ja durchschneiden oder einschneiden müssen. Darum ging das nicht. Und auf'm Computer,

der hat zwar auch vier Teile, aber, wenn da vier Teile waren, dann hat er's nie zusammengepuzzelt und ja da, da wusste man auch nicht den Grund, warum puzzelt der das jetzt nicht zusammen, hat der ne Macke der Computer, oder? Also da würd ich dann ne 6 für geben. [...]. Also ich finde beim Computer war das, da ging das nicht und wenn hier die vier nebeneinander wären, dann ja, dann hatt ich, also ich hatt das zuhause nachgemacht, dann hab ich den immer hochgehoben wie so'n Globus, und dann hab ich immer so Kanten, diese vier Kästen (Quadratflächen) gehabt, dann hab ich gedacht, ja dann hab ich ne erstmal so, wie ich's gerade gezeigt hab, so und so, und dann hab ich'ne immer eingeritzt.

Johannes verdeutlicht seinen Anspruch, "es" selber verstehen zu wollen. Mit Hilfe des Programms ist dies jedoch für ihn nicht möglich, da kein Faltvorgang animiert wird und ihm keine weiteren Möglichkeiten zur Benutzersteuerung zur Verfügung stehen. So ist er nachhaltig irritiert und verschafft sich letztlich durch Anfertigung eines Materialnetzes seine eigene Benutzersteuerung. Hiermit kann er im Gegensatz zur computeranimierten Darstellung geeignete mentale Repräsentationen entwickeln und sein Verstehensproblem lösen.

Der Aspekt "Der Computer als dynamischer Visualisierer und visueller Ideengeber mit Anregungsfunktion und der Möglichkeit der (eingeschränkten) Kontrolle" wurde bereits anhand der prototypischen Fallbeispiele thematisiert. Auch in den anderen Interviews zeigte sich dieser:

Beispiel Lisa:

„Ja, wenn ich mal nicht weiter wusste, dann hat der [Computer] mir weitergeholfen. Ich stell mir den Würfelnetz immer in Gedanken vor und wenn ich weiß der geht, aber wenn ich mir nicht sicher bin, dann klick ich drauf und merk ... dann soll der Computer den dann immer selber zusammenbauen und dann ..., dann weiß ich, dann bin ich mir sicherer, dass er geht.“

Beispiel Lea-Kathrin:

*„Also, früher habe ich keine Netze zusammengebaut und jetzt habe ich Netze zusammengebaut und ich kann das [...] also, durch das Lernen am Computer und auf'm Blatt. [...] Also, Netze zusammenzubauen und so **wie man das macht** [...] **wie** man Netze zusammenbaut [...] wie viele es gibt. [Der Computer hilft mir], weil der Computer, dass dann auch **richtig zeigt**.“*

Beispiel Juliane:

*„Also, ähm Vorteile hat's, dass man das sieht, **wie** man das faltet (J fasst sich mit einer Hand zum Kopf), **weil im Kopf sehe ich das nur so einzelne Schritte**, [...] und da [am Bildschirm] kann man das richtig mitverfolgen (J zeigt auf den Bildschirm) und ähm, Nachteile hat's auf'm Papier, dass man nicht irgendwie sehen kann, **wie's denn aussieht**, wenn ich's **richtig** gefaltet hab. Also bei mir im Kopf*

*ist das so: Ich seh's noch nicht mal ne Sekunde und da ist das wieder auseinander [...] und beim Computer ist das ja so, wenn ich zusammenfalten würde und mich da mal vertan hätte, wüsste ich ja auch gleich, dass das falsch ist und da (J zeigt auf das Material) müsste ich dann erst wieder rumbasteln.“ [...] Also am Anfang würd ich erstmal für so'n paar Aufgaben den Computer dazu nehmen, weil der erklärt mir, also zeigt mir auch, **wie ich das überhaupt machen soll, wie ich mir das im Kopf vorstellen kann** [...] also, weil der faltet ja auch die Seiten hoch, automatisch. Und, dass ich **überhaupt mal weiß, wie** das überhaupt gehen, also **richtig** gehen soll. Wenn ich jetzt noch 'n bisschen wackelig mit dem Material bin, dann würd ich auch erstmal den Lehrer fragen oder selber den Computer anschalten, weil das ist ja eben besser, als das Material, weil der Computer, der sagt mir dann ja auch, ob's richtig ist oder falsch und da (J zeigt auf das Material) könnt ich ja jetzt zu meinem Lehrer sagen, ich hab alles richtig, und da schreiben wir auf einmal 'ne Mathearbeit und (J hebt ratlos und unsicher beide Hände)?“*

Beispiel Helena:

„Würfelnetze die ich vorher noch nicht so wirklich gedacht habe, dass es geht. [...] Die gingen dann doch und das habe ich dann erst da gesehen und vorher hätte ich das nicht gedacht, dass die auch wirklich gehen. [...] Wenn man das erst am Computer macht, dass man meinetwegen einmal am Computer ist und macht, dann hat man die ja einmal und dann kennt man die und dann ist es dann nachher auf'm Blatt vielleicht auch 'n bisschen einfacher, weil man kann sich das dann am Computer einmal so sehen und dann hat man mehr die Vorstellung auf'm Blatt nachher, ob das jetzt wirklich richtig ist.“

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Computeranimationen bieten als visueller Ideengeber und dynamischer Visualisierer die Außenperspektive auf die Handlung, ohne dass die Lernenden durch konkretes Tun in die Handlung involviert sind. Dadurch ermöglichen sie ihnen Überblick und Orientierung bei der Entwicklung mentaler Modellierungen. Sie zeigen den Lernenden, um "WAS" es geht und "WIE" sie sich räumliche Veränderungsprozesse vorstellen können. Hierbei nimmt der letzte Teilaspekt (das "WIE") den zentralen Stellenwert ein.

In der Rolle als visueller Ideengeber können Computeranimationen Lernende dabei unterstützen sowohl einen ersten Zugang zu lernrelevanten Beobachtungs- und Analyse-Prozessen zu finden ("facilitating function") ("Entwicklungsprozesse vom Betrachter zum Beobachter") als auch zusätzliche kognitive Prozesse auf einer tieferen Verarbeitungsebene auszuüben ("enabling function").

In der Rolle als dynamischer Visualisierer stehen Computeranimationen stellvertretend für Handlungen und strukturieren durch den visuell vorgegebenen Handlungsablauf (Bewegungen und Verformungen von geometrischen Objekten) die Gesamthandlung. Sie zeigen Veränderungen und Invarianten, veranschaulichen so unmittel-

bar die Dynamik des Sachverhalts und ermöglichen eine visuelle Unterstützung der mentalen Simulation. Dadurch machen sie die geometrischen Operationen durchsichtiger und können das Vorstellen von Bewegungen und das funktionale Denken (d.h.: "Was passiert mit der einen Größe, wenn ich die andere verändere?") fördern.

Im Vergleich zu den darstellungsflüchtigen konkreten oder mentalen Handlungen (Medien "Material", "Papier") tritt die computeranimierte *algorithmische* Darstellung *desselben Faltvorganges* im Hinblick auf die Möglichkeit zur (wiederholten) Beobachtung, Analyse und Reflexion und damit auch zur eigenen Kontrolle positiv wirkend hervor.

4.4 Die Unterstützung durch Computeranimationen

4.4.1 Äußerlich-medial – von hilfreich über unnötig bis störend

Wird der gesamte Lernprozess als Spektrum mit einem (relativen) Anfang und einem (relativen) Ende betrachtet, so verändert sich durch den kontinuierlichen Zugewinn an Expertise des Lernalters jeweils auch die Bedeutung der Computeranimationen für das eigene Lernen bzw. Arbeiten.

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Perspektiven auf die Frage einer lernerangepassten instruktionalen Gestaltung des Lerngegenstandes während des gesamten Lernprozesses beschrieben: Geht es um eine Passung im Lern- und Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen und damit um eine herzustellende Passung zwischen der computeranimierten Darstellung und dem Beobachten und Denken *während* der Entwicklung mentaler Modellierungen, oder geht es um eine Passung zwischen Medium und Lerner *nach* abgeschlossenem Lernprozess in einem Arbeitsprozess? Insgesamt zeigt sich bei der Beantwortung dieser Fragen,

- wie unterschiedlich bedeutsam diese Passung in den einzelnen Phasen individueller Lernprozesse ist,
- welche (Teil-) Aspekte phasenspezifisch als Einflussfaktoren in den Vordergrund treten, die eine herzustellende Passung unterstützen bzw. behindern und dadurch cognitive load vermeiden bzw. erzeugen,
- dass die beschriebene Passung entsprechend der individuellen Lernbiographien bzgl. des Lerngegenstandes unterschiedlich bedeutsam für den subjek-

tiv empfundenen Nutzen und Einfluss von Computeranimationen auf die (Raum-) Vorstellungsentwicklung bewertet wird.

Dies lässt sich anhand einzelner Stadien im individuellen Entwicklungsprozess mentaler Modellierungen näher charakterisieren:

Phase im Lernprozess mit den Computeranimationen	1) Zentrale Aspekte für eine Passung ... 2) Passungsprobleme entstehen vorwiegend durch ...
Lernszenario B: Der Lernende kann eine eigenständige mentale Modellierung noch nicht durchführen. (Erst-) Entwicklung mentaler Modellierungen (Transformieren der computeranimierten Darstellung).	1) "Grad des Involviert-Seins des Lernenden in die konkrete Handlung" 1) Algorithmische Darstellung (Wiederholung) und Visualisierung
Lernszenario A: Der Lernende führt eine eigenständige mentale Modellierung durch und greift vergleichend und kontrollierend auf die Computeranimationen zurück.	2) Fehlen der benutzergesteuerten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten und die Einschränkungen durch die algorithmische Darstellungsweise der Computeranimationen 2) Flüchtigkeit der animierten algorithmischen Darstellungsweise (Visualisierungsdauer)
Abschluss: Können die Lernenden eigenständige mentale Modellierungen sicher durchführen, so werden die Computeranimationen insgesamt überflüssig(er) und erzeugen unnötigen extraneous cognitive load.	

Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Phasen im Lernprozess und Aspekten der Passung

Im Folgenden wird diese Tabelle hinsichtlich eines modelltheoretischen Entwicklungsverlaufes näher erläutert:

Können Lernende eine eigenständige mentale Modellierung noch nicht durchführen und sind durch die kognitiven Anforderungen bei der simultanen Durchführung und Beobachtung einer eigenen konkreten Handlung überfordert, so stellt der Teilaspekt "Grad des Involviert-Seins des Lernenden in die konkrete Handlung" einen besonderen Einflussfaktor auf die Entwicklung mentaler Modellierungen dar. Hier zeigt sich die "facilitating function" von Animationen.

Das Herstellen einer Passung (durch "Synchronisation und Koordination") zwischen dem eigenen Handlungsprozess und dem Beobachtungs-und-Denkprozess wurde neben der konkreten Durchführung der Handlung und mentalen Planungs- sowie Analyse- und Reflexionsprozessen als eine der kognitiven Mehranforderungen herausgearbeitet, die zur Überforderung dieser Lernenden führen kann.

Die Computeranimationen ersetzen einige dieser Mehranforderungen, die somit für den Lernenden entfallen. Es bleiben aber die Anforderungen der Synchronisation und Koordination, welche darin bestehen, das eigene Beobachten und Denken auf die vorgegebene, (computer-) animiert ablaufende Handlung auszurichten.

Die Animationen des Programms "*Matheland*" scheinen Lernende bei der (Erst-) Entwicklung mentaler Modellierungen deutlich zu unterstützen. Die Flächen werden nacheinander gefaltet, wodurch der Lernende schrittweise durch die animierte Handlungsdarstellung geleitet wird und die Gefahr von "Split-Attention" minimiert ist.

Bei den Animationen der Internetplattform "*Mathematikus*" ist diese Gefahr der Aufmerksamkeitsteilung und demzufolge auch die kognitive Belastung höher, da die Flächen gleichzeitig gefaltet werden. Dadurch können diese Animationen bei der (Erst-) Entwicklung mentaler Modellierungen kaum Unterstützung für den Lernenden bieten.

Der Flüchtigkeit der computeranimierten Darstellung und einer verloren gegangenen Passung kann in dieser Phase des Lernprozesses (Transformieren) durch wiederholtes Ablaufen-Lassen der Animation entgegengewirkt werden, weil so verschiedene Beobachtungsschwerpunkte zeitlich sukzessive gelegt werden können. Das Fehlen weiterer benutzergesteuerter Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten scheint in dieser Phase noch keine bedeutsame Rolle zu spielen, da es vornehmlich um eine (Erst-) Entwicklung mentaler Modellierungen mit Hilfe des Fremdhandlers geht.

Im Verlauf individueller Entwicklungen (bzw. manche Lernende steigen direkt an dieser Stelle in den Lernprozess ein) sind Lernende zunehmend in der Lage, mentale Modellierungsprozesse selbstständig, im Sinne des mentalen Handelns mit mentalen Objekten, durchzuführen. In diesen Phasen zeigt sich die "enabling function" von Animationen dadurch, dass Lernende durch die Computeranimationen unterstützt werden können, zusätzliche mentale Prozesse auszuüben. So können unvollständ-

ge oder fehlerhafte mentale Modellierungen ergänzt und korrigiert und zu lauffähigen mentalen Modellen weiterentwickelt werden.

Da die Lernenden mehr und mehr in der Lage sind, die kognitiven (Mehr-) Anforderungen selber zu erfüllen, tritt die bis dato positive Wirkweise der Einflussfaktoren "Grad des Involviert-Seins in die Handlung" und der "Wiederholungsaspekt der algorithmischen Darstellung" zunehmend in den Hintergrund. Bisweilen lässt sich gar eine gegenteilige Entwicklung konstatieren: *Weil* Lernende mehr und mehr dazu in der Lage sind, stehen sich unterschiedliche Handlungsabläufe zu ein und demselben Objekt gegenüber, ohne dass eine Übereinstimmung zwischen dem vorgestellten Handlungsablauf der mentalen Modellierung und dem computeranimiert dargestellten Handlungsablauf garantiert wäre. Hierbei ist zu vermuten, dass die vorgefertigten Faltalgorithmen eher selten mit den konkreten oder mentalen Faltreihenfolgen der Lernenden übereinstimmen und es lässt sich erwarten, dass lediglich die Start- und Endposition einzelner Flächen beobachtet und mit der eigenen mentalen Modellierung verglichen wird.

In dieser Phase des Lernprozesses führt vor allem das Fehlen der benutzergesteuerten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten und mit dem Aspekt der Visualisierungsdauer auch die Flüchtigkeit der algorithmischen Darstellungsweise der Computeraanimationen zu Passungsproblemen zwischen der computeranimiert dargestellten Handlung und der mentalen Modellierung. Dazu exemplarisch Johannes:

„Also die Vorstellungen im Kopf und der Computer das ist ein großer Unterschied, weil die Vorstellung im Kopf ist manchmal - für mich finde ich - genauer wie der Computer: Weil wenn ich jetzt den Computer hab, der faltet es zwar etwas langsam hoch, aber, wie gesagt er dreht das Teil, und [...] ich drehe das Teil im Kopf meistens nicht, sondern klappe es normal hoch. Ja, und darum finde ich - Kopf ist 'n bisschen genauer.“

Dadurch, dass das am Bildschirm dargestellte Netz unmittelbar vor dem Faltprozess durch eine Rotation in eine neue (Standard-) Ausgangslage gebracht wird (die Ausführungen beziehen sich auf das Programm "Matheland"), erhöht sich die Flüchtigkeit der computeranimierten Darstellung weiter und dem Lernenden entstehen kognitive Mehranforderungen. Es ist zu erwarten, dass es dadurch schwerer fallen wird, den gesamten Faltprozess und insbesondere Start- und Endposition einzelner Flächen mitzuverfolgen und mit der eigenen mentalen Modellierung zu vergleichen.

Können die Lernenden eigenständige mentale Modellierungen sicher durchführen und haben zudem propositionale Repräsentationen gebildet, so ist der Lernprozess weitgehend abgeschlossen und der unterstützende Einfluss der Computeranimationen wird insgesamt überflüssig(er), in einigen Fällen sogar störend. Da der Lernende mittlerweile Experte ist, besteht für ihn nicht mehr die Notwendigkeit, eine Passung zwischen der computeranimierten Darstellung und der mentalen Modellierung bzw. der propositionalen Repräsentation herzustellen. Dies führt im ganzen zu einer fehlenden Passung zwischen Individuum und Medium.

Mit der zunehmenden Expertise des Lernenden verändert sich somit der Stellenwert der unterschiedlichen Einflussfaktoren und die Wirkweise insgesamt: Die zunächst für den "Lernprozess des Lernenden" hilfreiche instruktionale Gestaltung wird zu einem immer überflüssiger werdenden Werkzeug im "Arbeitsprozess des Experten".

Dieser modelltheoretische Entwicklungsverlauf verdeutlicht ein allmähliches Loslösen von dem Medium Computer. Dies zeigte sich sowohl in der Unterrichtseinheit als auch in den Interviewphasen, in denen sich die Kinder reflektierend über die eigene Mediennutzung äußerten: Insgesamt lösen sich alle Schüler von der Material- und Computerrepräsentation. Der von ihnen präferierte Einsatz der (in dieser Untersuchung genutzten) Medien orientiert sich an den jeweilig inhärent bereitgestellten Hilfen gemäß der Stufung 1. Computeranimationen, 2. Material und 3. Papier.

4.4.2 Innerlich-mental – Bewegungsroutinen und Handlungsroutinen

In zahlreichen Interviewsituationen wurden den Kindern Aufgabenstellungen zu den Netzen dargeboten, wobei ein Rückgriff auf die Computeranimationen ausgeschlossen war. Bei den Beschreibungen der Kinder wurde jedoch – die im Rahmen der Unterrichtseinheit erfahrene – unterstützende Funktion der Computeranimationen deutlich, die sich jetzt *während* des mentalen Simulationsprozesses zeigte.

Beispiel Lea-Kathrin:

„... ja, ich denke mir das ja auch im Kopf zusammen. Dann ist das eigentlich gleich – mein Kopf und der Computer ...“;

„... ich hab mir das so vorgestellt, als ob der Computer das mir, als ob mein Gehirn das wieder aufklappt [sie zeigt dabei mit ihren Händen zuerst auf ihren Kopf, macht dann unterstützende Begleitbewegungen des Klappvorganges mit ihren Händen] ...“

Beispiel Michi:

„...Man sieht ihn [das Netz], dann wird das [die Flächen] ... wie jetzt vom Computer ganz langsam hochgeklappt, und dann ist das [die Flächen] hier [sie zeigt darauf]...“

Die verbalen Beschreibungen der Kinder legen nahe, dass sie durch ihre zurückliegende Arbeit mit den Computeranimationen "innere Abbilder von äußeren Prozessen entwickelt haben" und so durch die Computeranimationen eine *innere* Unterstützung *während* ihres mentalen Modellierungsprozesses erfahren.

Mit den Worten der Kognitionspsychologie ausgedrückt: Die bereits vorliegenden, mental transformierten Computeranimationen lassen sich als gebildete Schemata charakterisieren, die „typische Zusammenhänge zwischen Informationseinheiten in einer organisierten Wissensstruktur [repräsentieren]. Sie bilden einerseits Wissen ab, steuern andererseits aber auch den Erwerb neuer Informationen, indem sie helfen, diese zu ordnen und zu organisieren“ (vgl. Niegemann 2008, S. 43).

So können die bereits gebildeten Schemata – die mental transformierten Computeranimationen – den Lernenden eine *innere* Unterstützung *während* ihrer mentalen Modellierungsprozesse bieten. Die aus dem Langzeitgedächtnis aktivierte, vorgestellte Computeranimation nimmt den Stellenwert einer mental introspektiven Unterstützung *während* der Konstruktion einer dynamischen mentalen Modellierung ein.

Umgangssprachlich: Die Lernenden erinnern sich an Computeranimationen, die sie am Computerbildschirm gesehen haben und nutzen diese Erinnerung als *innere* unterstützende Hilfe *für* und *während* ihres mentalen Modellierungsprozesses.

Im Hinblick auf die *innere* Unterstützung werfen die indirekten verbalen Beschreibungen der Lernenden die Frage auf, ob sich die mental abgespeicherten Computeranimationen als *Bewegungsroutinen* oder *Handlungsroutinen* charakterisieren lassen: Werden die computeranimierten dynamischen Prozesse in der Art mental transformiert, dass Lernende mentale Bewegungs- und/oder Handlungsroutinen entwickeln?

Unter mentalen *Bewegungsroutinen* sollen im Folgenden Schemata verstanden werden, die innerlich, automatisiert wie ein "Film" vor dem geistigen Auge ablaufen, ohne dass auf den Ablauf Einfluss genommen wird. Die mentale Aktivität besteht dabei in dem inneren Repräsentieren, also dem "Ablaufenlassen des Films", wobei die Fähigkeit des aktiven Operierens mit dem gedanklichen Objekt noch nicht benötigt wird.

Ein Beispiel zur Verdeutlichung: Stellen Sie sich vor, dass Sie schon einmal das Zusammenfallen des "Kreuz-Würfelnetzes" in folgender animierter Form gesehen haben: Langsam faltet sich der "Ring" zusammen und die übrigen Flächen schließen dann als Boden und Deckel den Würfel. Kann es nicht sein, dass Sie diesen "Film" gedanklich einfach so ablaufen lassen können, nur weil Sie ihn schon oft gesehen und diesen Prozess memoriert haben, ohne dass Sie ihn zielgerichtet gedanklich beeinflussen – analog zu gewissen Alltagsroutinen, auf die Sie während der Ausübung keine mentale Aktivität und Anstrengung richten, die also automatisiert ablaufen?

Im Gegensatz dazu verstehe ich unter mentalen *Handlungs*routinen Schemata, bei denen sich die mentale Aktivität auf Veränderungsprozesse der mentalen Objekte richtet. Stellen Sie sich dazu bspw. das Zusammenfallen eines Dodekaeder- oder I-kosaedernetzes vor oder die Kippfolge "hoch-rechts-hoch-rechts" eines Spielwürfels, bei dem die 1 in der Startposition oben liegt.

Im Zusammenhang mit dieser Unterscheidung und der *innerlich* unterstützenden Funktion der transformierten Computeranimationen legen die indirekten verbalen Beschreibungen der Kinder nahe, dass insbesondere mentale Bewegungsroutinen die innerlich unterstützende Funktion *für* und *während* mentaler Modellierungsprozesse aufweisen: Es wird deutlich, dass sich die Kinder vorstellen, wie der Computer es (den Faltvorgang) gemacht hat und dass sie diese Vorstellung unterstützend für die Problemlösung nutzen. Dies kann in zweierlei Weise interpretiert werden:

1. Die mental gespeicherte Bewegungsroutine liefert direkt die Problemlösung. In diesem Fall ist nicht der Lernende der Akteur mentaler Handlungen, sondern vielmehr der "personifizierte Computer in seinem Kopf". Die vorgestellte Handlung erfolgt "ausgeübt von diesem Computer" und lässt sich aus der Perspektive des Lernenden als *mental beobachtbare Bewegung* charakterisieren.
2. Die mental gespeicherte Bewegungsroutine dient dem Lernenden als unterstützende *innere* Hilfe bei einer eigenständigen Modellierung, zur Ausbildung einer mentalen Handlungsroutine.

4.4.3 Reduktion des Cognitive Load durch äußere und innere Unterstützung

Die im Kapitel 4.3.1 auf S. 136f bei der Analyse verbaler und nonverbaler Sprache herausgearbeiteten Charakteristika können zur Beschreibung der *äußeren* sowie der *inneren* Unterstützung von Computeranimationen genutzt werden: Im Hinblick auf die

- äußere Unterstützung mit dem Unterschied, dass es nicht um eine Auslagerung kognitiver Prozesse im dualistischen Sinne geht, sondern vornehmlich um ein Auslagern der kognitiv zu leistenden, aber evtl. noch nicht leistbaren Anforderungen (das, was mental zu leisten *wäre*).
- innere Unterstützung mit dem Unterschied, dass es bei dem Rückgriff auf "Bekanntes" – auf die mentalen Bewegungsroutinen – nicht um eine *Auslagerung* sondern um eine *Verlagerung*, *Vergegenwärtigung*, *Vergegenständlichung* und dadurch Reduktion der kognitiven Anforderungen geht, die durch die mental transformierten Computeranimationen (Bewegungsroutinen) "ersetzt" werden. Zudem handelt es sich durch das Mentale Beobachten bei den "Ankerpunkten" um "mental-visuelle Ankerpunkte".

Insgesamt verdeutlicht sich mit der "facilitating function" und der "enabling function" die *äußere* orientierende Unterstützung der Computeranimationen *für* mentale Modellierungsprozesse des Lernenden. Diese unterstützenden Funktionen zeigen sich insbesondere darin, dass das "Vorstellen von Bewegung" durch die explizite Darstellung der dynamischen Prozesse und den damit verbundenen räumlich-dynamischen Bilderfahrungen des Lernenden gefördert wird. Dadurch werden vor allem die dynamischen Aspekte des räumlichen Vorstellungsvermögens betont.

Im Hinblick auf die *innere* Unterstützung scheinen insbesondere mental abgespeicherte Objektveränderungen – das Vorstellen der dynamischen Prozesse – die *innere* unterstützende Funktion *während* der mentalen Modellierungsprozesse des Lernenden auszuüben. Die Analysen legen zudem nahe, dass mentale Bewegungsroutinen auf dem Weg zur Ausbildung mentaler Handlungsrouninen gebildet werden und diese innerlich unterstützende Funktion bieten.

So lässt sich insgesamt festhalten: Computeranimationen können Lernenden eine *äußere* sowie *innere* orientierende Unterstützung *für* und *während* mentale(r) Modellierungsprozesse bieten.

Die *Verkürzung* von eigenen Handlungen durch lernergesteuerte Einflussmöglichkeiten kann erst basierend auf erfolgten Analyse- und Erkenntnisprozessen vorgenommen werden: Hat ein Lernender mentale Modellierungen zu einer Handlung entwickelt, so kann er im Rahmen einer erneuten Lernsituation durch Deutungsprozesse diese gebildeten Schemata aktivieren und dann die Verkürzung der Handlung eigenständig und lernerangepasst vornehmen. So äußert sich in der verkürzten Handlung die Anwendung merkmalsgebundener Erkenntnisse. Die *Verkürzung* von eigenen Handlungen kennzeichnet damit zugleich eine Abstraktion von eben dieser.

Im Unterschied dazu ist die *Verkürzung* der Bewegungen durch den Einsatz unterschiedlicher Fremdhandler von dem Lehrenden äußerlich vorgegeben bzw. ermöglicht der Medieneinsatz nur eingeschränkte benutzergesteuerte Einflussmöglichkeiten in Abhängigkeit von dem jeweiligen Fremdhandler.

Während der Selbsthandler die Verkürzung der Handlung von der eigenen konkreten Handlung über die eigene stellvertretende Handlung eigenständig aufgrund erfolgter Analyse- und Erkenntnisprozesse vornimmt, geschieht die Verkürzung der Bewegung äußerlich vorgegeben durch den Einsatz der Fremdhandler von der fremden "konkreten Handlung" über die fremde "stellvertretende Handlung" aufgrund von außen angenommener, intendierter Analyse- und Erkenntnisprozesse des Lernenden. In dem Falle, dass der Lernende Einfluss auf eine Fremdhandlung nehmen kann, lassen sich die Verkürzungsprozesse als "unterschiedliche Ausgestaltungen" zwischen den beiden Polen "äußerlich vorgegeben" und "eigenständig vorgenommen" charakterisieren, dabei jeweils aufgrund erfolgter Analyse- und Erkenntnisprozesse.

Insgesamt wird bei der Verkürzung der Handlung bzw. Bewegung die Visualisierung des Dynamischen mehr und mehr durch die mentale Modellierung des Lernenden ersetzt. Die äußeren Repräsentationen lassen sich somit im Sinne eines Prozesses des Ver-Statishens interpretieren.

4.5.2 Kognitive Anforderungen beim "Konkreten und Mentalen Beobachten von Fremdhandlungen" und beim "Konkreten und Mentalen simultanen Handeln und Beobachten"

Am Fallbeispiel "Michi" wurde herausgearbeitet, welche kognitiven (Mehr-) Anforderungen bei der *"simultanen Durchführung und Beobachtung einer konkreten eigenen Handlung"* im Vergleich zu der *"reinen Beobachtung einer fremden Handlung"* an Lernende gestellt werden: Mit der Hybridperspektive wurden Anforderungen eines ständig vorzunehmenden Perspektivwechsels des Lernenden zwischen der Außen- und der Binnenperspektive formuliert. Zudem wurden mit dem Anspruch der eigenen Strukturierung und Orientierung mentale Planungsprozesse für die Handlung herausgestellt.

Es erscheint plausibel, dass durch diese kognitiven Mehranforderungen ebenso die Komponenten "Mentales Beobachten" und "Mentales Handeln" unterschieden und charakterisiert werden können. (Obgleich "Mentales Beobachten" und "Mentales Handeln" im Vergleich zum "Konkreten Beobachten" und "Konkreten Handeln" bereits durch den Repräsentationsmodus deutlich höhere kognitive Anforderungen an die Lernenden stellen, so spielt diese Tatsache im direkten Vergleich "auf mentaler Ebene" wiederum keine Rolle.)

Das vergleichende Herausstellen dieser kognitiven Mehranforderungen soll die Dualität der kognitiven Anforderungen zwischen "Konkretem *und* Mentalem Beobachten von Fremdhandlern" sowie dem "simultanen Durchführen und Beobachten von eigenen konkreten *und* mentalen Handlungen" verdeutlichen.

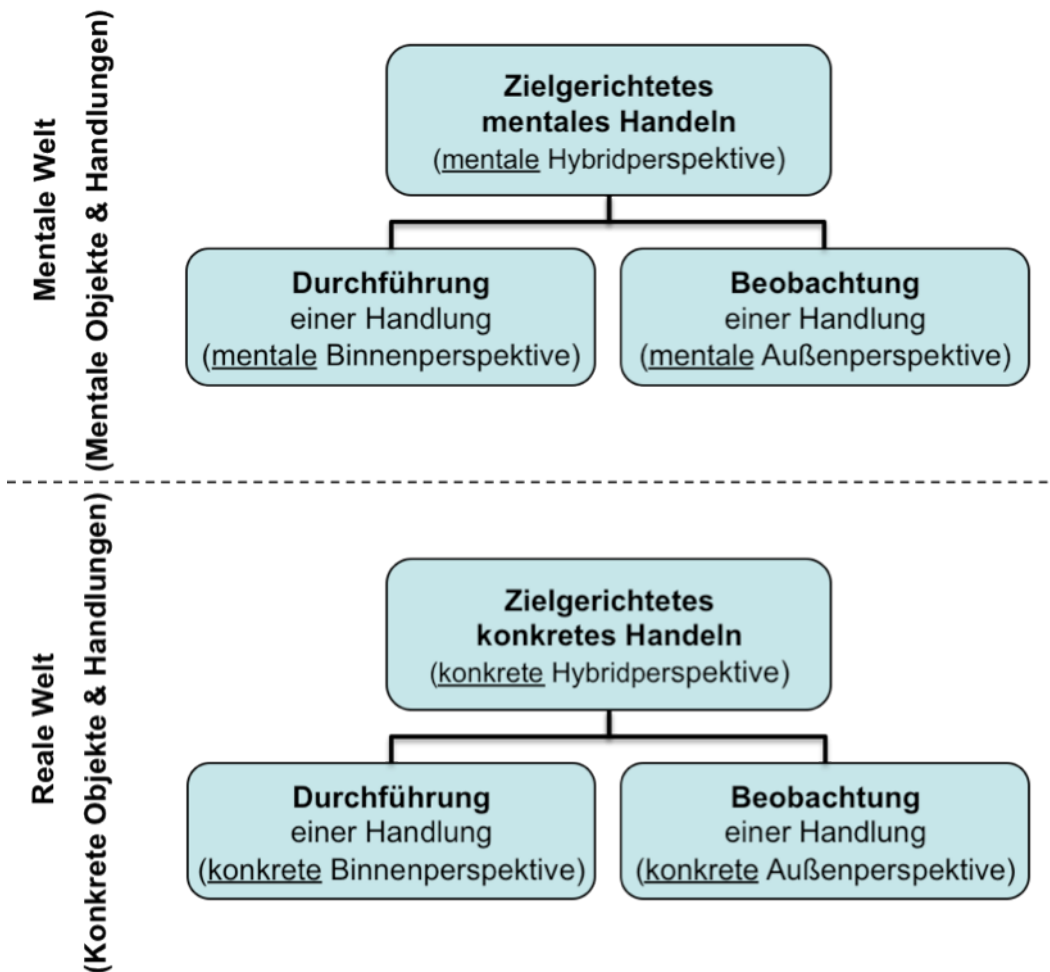


Abbildung 25: Überblick über die Zusammenhänge kognitiver Anforderungen

Das reine mentale Beobachten einer innerlich ablaufenden Bewegungsroutine – "Innere Filme beobachten"

Bei der mentalen Beobachtung tritt das zielgerichtete Handeln in den Hintergrund. Der Lernende kann sich in der Rolle des "Beobachters innerlich ablaufender Bewegungen" "zurücklehnen", **auf** die vor seinem geistigen Auge ablaufenden Bewegungen schauen und diese "nur" analysieren. Durch diese "mentale Außenperspektive **auf** die Dinge" wird ihm ein Überblick über die Gesamt-Bewegung ermöglicht, ohne darin durch aktive mentale Konstruktionen involviert zu sein. Seine Analysen kann er dennoch in der Weise vornehmen, dass er Hypothesen dadurch entwickelt und prüft, indem er sich die mentale Animation mehrfach "ansieht". Bei seinen Analysen geht es um das Generieren und Verifizieren von Hypothesen durch mehrfaches zielgerichtetes mentales **Hinsehen** und Beobachten.

Zusammenfassend: Bei der mentalen Beobachtung können sich Lernende in der mentalen Außenperspektive zurücklehnen, den inneren Film ablaufen lassen und sich nur auf die mentale Beobachtung und Analyse konzentrieren. Metaphorisch: "Lernende sind Zuschauer und Beobachter des inneren Films".

Das simultane Durchführen und Beobachten der eigenen mentalen Handlung – "Selber Filme erzeugen"

Das zielgerichtete mentale Handeln ist hier vom Lerner selbst "zu leisten" und involviert ihn somit als "mentalen Akteur der Handlung" **in** die Durchführung des gesamten mentalen Handlungs-Prozesses. Dadurch wird er selbst zum Teil der mentalen Handlung. Der Lernende kann sich nicht nur als "Beobachter seiner mentalen Handlungen" mit Blick **auf** die Handlung "zurücklehnen" und diese "nur" analysieren (metaphorisch: "Er kann nicht nur Zuschauer und Beobachter sein"), sondern er muss die mentale Handlung außerdem eigenständig planen und durchführen (metaphorisch: "Er ist Regisseur und Akteur in seinem zu erstellenden Film zugleich"). Dazu muss er mentale Planungs-Prozesse für einzelne Teilschritte sowie für die Gesamthandlung vollziehen und zudem sein gesamtes Tun analysieren und reflektieren.

Damit ist der Lernende gefordert, einen ständigen mentalen Perspektivwechsel zwischen der gedanklichen Durchführung (Binnenperspektive) und der Beobachtung (Außenperspektive) eigener Handlungen vorzunehmen. Diese übergeordnete Perspektive, die das Integrieren beider Perspektiven bzgl. des Lerngegenstandes erfordert, bezeichne ich im Folgenden als "mentale Hybridperspektive". Bei seinen Analysen geht es um das Generieren und Verifizieren von Hypothesen durch mehrfaches zielgerichtetes mentales **Handeln** und Beobachten.

Zusammenfassend: Als mental Handelnde müssen Lernende mentale Planungsprozesse für die mentale Handlung ausführen und zudem mit der mentalen Hybridperspektive einen ständigen Perspektivwechsel zwischen der mentalen Binnen- und Außenperspektive vornehmen. Metaphorisch: "Lernende sind zugleich Regisseure, Akteure und Zuschauer / Beobachter ihres eigenen neu zu erstellenden Handlungs-Films".

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse der Untersuchung wie folgt zusammenfassen:

- (1) Mit Hilfe von drei prototypischen Vorgehens- und Verhaltensweisen konnte ein Spektrum unterschiedlicher Möglichkeiten des Einflusses von Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung erfasst und beschrieben werden.
- (2) Diese prototypischen sowie weitere beobachtete Vorgehens- und Verhaltensweisen der Lernenden lassen sich mit dem Phänomen des Cognitive (Over-) Load auf dem Hintergrund der Cognitive Load Theory erklären.
- (3) Insbesondere konnte der separate Stellenwert und die Bedeutung des reinen Beobachtens herausgearbeitet werden.

Zu (1): Welchen Einfluss können Computeranimationen auf die Raumvorstellungsentwicklung haben?

Die Fallbeispiele zeigen ein breites Spektrum des von den Kindern empfundenen Nutzens des Computereinsatzes auf, von der zeitlich verlangsamenden und behindernden Wirkung des Computers im "Arbeitsprozess des Experten" bis hin zu seiner unterstützenden Wirkung als visueller Ideengeber und dynamischer Visualisierer im "Lernprozess des Lernenden". Im Einzelnen:

- (1) Für Lernende mit hoher mentaler Repräsentationsfähigkeit lässt sich kein zusätzlicher Nutzen erkennen. „Der Computer ist dann viel zu langsam“ und wird sogar als Störelement empfunden (Erzeugen von extraneous cognitive load).
- (2) Vielen Lernenden nützt die Computerrepräsentation als ein unterstützendes Medium auf dem Weg zur Vorstellung. Die Unterstützung besteht vor allem im Ersetzen kognitiver Anforderungen und in der dynamischen Visualisierung und Ideengebung durch die animierte Darstellung.
- (3) Raumvorstellungsschwächere Lernende können durch die dynamische Computervisualisierung Orientierung und Unterstützung zum Sammeln von "dynamisch-räumlichen Bilderfahrungen" zur Entwicklung mentaler Repräsentationen erhalten, und zwar eventuell wirkungsvoller als durch eigenes Handeln.

Die beiden letztgenannten Punkte stehen im engen Zusammenhang mit der folgenden Hypothese, die sich aus den Interviews herauskristallisierte:

"Das simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen kann bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen eine Überforderung darstellen und eine zentrale Ursache für Schwierigkeiten bei der Entwicklung von (Raum-) Vorstellung(en) sein!"

Aufbauend hierauf wäre in einer Folgeuntersuchung auch der Frage nachzugehen, ob die beschriebene Überforderung vielleicht gerade ein zentrales Charakteristikum für die als (raum-) vorstellungsschwächere Lernende bezeichneten Kinder ist und sich darüber hinaus zirkuläre Kausalzusammenhänge feststellen lassen ("Überforderung führt zur (Raum-) Vorstellungsschwäche" und umgekehrt "(Raum-) Vorstellungsschwäche führt zur Überforderung"?).

Welche unterschiedlichen kognitiven Anforderungen bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen im Zusammenhang mit dem "simultanen Durchführen und Beobachten eigener Handlungen" und im Zusammenhang mit dem "reinen Beobachten animierter Handlungen" an die Lernenden gestellt werden, konnte mit den Analysen herausgearbeitet und mit Hilfe der Begrifflichkeiten "Hybridperspektive", "Binnenperspektive" und "Außenperspektive" erfasst werden.

In der metaphorischen "Film-Welt" bedeutet dieses: Simultanes Durchführen und Beobachten eigener Handlungen erfordert vom Lernenden die Erstellung eines eigenen Films, wobei der Lernende zugleich Regisseur, Akteur und Zuschauer / Beobachter seines zu erstellenden Handlungs-Films ist (– sowohl konkrete als auch mentale Handlungs-Filme).

Das reine Beobachten animierter Handlungen hingegen erfordert vom Lernenden *"nur"* die Beobachtung eines ablaufenden Films, wobei der Lernende Zuschauer und zunehmend Beobachter (inklusive Analyse) des Bewegungs-Films ist (– sowohl konkrete als auch mentale Bewegungs-Filme).

Im Vergleich zum "reinen Beobachten animierter Handlungen" stellt das "simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen" durch die vorzunehmenden Perspektivwechsel und durch den Anspruch eigenständiger Strukturierung und Orientierung zusätzliche und somit insgesamt höhere kognitive Anforderungen an das Ar-

beitsgedächtnis des Lernenden und steht damit im Widerspruch zu dem didaktischen Prinzip des *fundamentalen* Charakters von Handlungen à la Piaget.

Viele Lernende leisten diese kognitiven Mehranforderungen und sind in der Lage, durch simultanes Handeln und Beobachten die "Hybridperspektive" einzunehmen und dadurch mentale Repräsentationen zu entwickeln. Diesen Lernenden wird durch die Animationen eine Unterstützung angeboten, die sie eventuell gar nicht benötigen. Wie am Fall "Jan" gesehen, kann es sogar zu einer hinderlichen Wirkung der Computeranimationen kommen. Darüber hinaus können Animationen durch ihre visuell vorgegebene Struktur und Orientierung aber auch zur "mental Passivität" verleiten, weil lernrelevante mentale Planungs- und Analyse-Prozesse zur Entwicklung mentaler Modellierungen nicht zwingend notwendig von den Lernenden geleistet werden müssen.

Dass es aber auch zur Überforderung kommen kann, hat sich in besonderem Maße bei "Michi" gezeigt: Lernende wie Michi schaffen es zwar, Handlungen mit dem Material durchzuführen. Sie sind dabei aber so sehr mit den Handlungen am Material beschäftigt und "Teil der Situation" (*Akteur*), dass sie es nicht schaffen, sich selber dabei zu beobachten und ihr gesamtes Tun zu reflektieren, weil sie die "Binnenperspektive" einnehmen. In der Auseinandersetzung mit dem Material fehlt ihnen die "Außenperspektive" und damit der Überblick über den gesamten Handlungsprozess (*Zuschauer / Beobachter*). Diese Außenperspektive können die Computeranimationen ermöglichen. Sie strukturieren durch den jeweils visuell vorgegebenen Handlungsablauf die Gesamthandlung und können dadurch den Lernenden bei der Entwicklung mentaler Repräsentationen Überblick und Orientierung bieten: Sie veranschaulichen unmittelbar die Dynamik des Sachverhalts und ermöglichen eine visuelle Unterstützung der mentalen Simulation. Durch das "reine Beobachten äußerer Prozesse" können sich diese Lernenden "auf eine Sache konzentrieren" und dabei einen ersten Zugang zum aktiven Mit- und Nachvollziehen, und damit zur Analyse finden, ohne selbst in die Handlung involviert zu sein. Danach können sie aus der Perspektive des Beobachtens in die Rolle der "konkret handelnd-reflektierten Akteure" eintreten und mit der Hybridperspektive zielgerichtet "*eigene Handlungen simultan durchführen und beobachten*" (*Regisseur, Akteur und Beobachter*).

Der Computer kann diese Lernenden somit als visueller Ideengeber und dynamischer Visualisierer bei der Entwicklung mentaler Modellierungen besonders dadurch unterstützen, dass er ihnen zusätzlich zu ihrer "Binnenperspektive" die "Außenperspektive" und dadurch Überblick, Orientierung sowie einen Zugang zur Analyse ermöglicht.

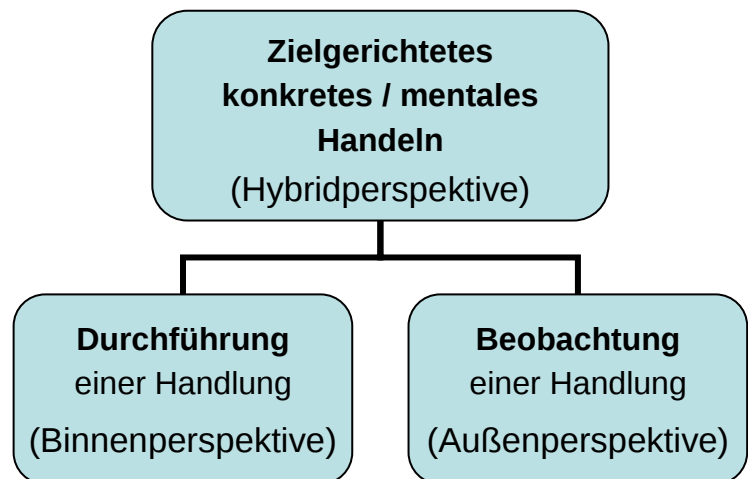


Abbildung 26: „Hybrid-, Binnen- und Außenperspektive“

So **ermöglichen** und unterstützen Computeranimationen bei diesen Lernenden den Zugang zu lernrelevanten Planungs- und Analyse-Prozessen und leisten damit einen Beitrag zur aktiven und selbstständigen Durchführung mentaler Simulations-Prozesse. Dadurch können auch diese Lernenden mehr und mehr die Rolle der "zielgerichtet mental handelnden Akteure" einnehmen.

Allerdings kann das "Ersetzen" der kognitiven Anforderungen durch die Computeranimationen auch lernrelevante Planungs- und Analyse-Prozesse **be-** bzw. **verhindern**, weil diese nicht notwendig von den Lernenden geleistet werden müssen und die Computeranimationen dadurch zur "mental Passivität" verleiten können.

Insgesamt zeigen sich in diesen deutlich unterschiedlichen Wirkweisen die *beiden Gesichter des Ersetzens kognitiver Anforderungen* und damit letztlich die Abhängigkeit vom Lernenden selbst: Die jeweilige Wirkweise der Computeranimationen hängt von der Bereitschaft und Fähigkeit zur Analyse und damit von lernerspezifischen Merkmalen ab.

Neben den in der Fachliteratur bekannten lernerspezifischen Merkmalen, wie "Vorwissen", "Ausprägung des Räumlichen Vorstellungsvermögens", "Selbstwirksamkeitserwartungen des Lernenden bzgl. des Mediums" und "Lernmotivation" (vgl. bspw. Lewalter 1997a; 1997b) konnten im Rahmen dieser Studie mit der "Fähigkeit zum reinen Beobachten" und der "Fähigkeit zum simultanen Handeln und Beobachten und zu der damit verbundenen Einnahme der Hybridperspektive" zwei weitere

lernerspezifische Merkmale herausgearbeitet werden, welche entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung mentaler Modellierungen nehmen können.

Zudem ist die Wirkweise davon abhängig, in welcher Phase im Entwicklungsprozess eines Lernenden die Computeranimationen eingesetzt werden. Mit seiner zunehmenden Expertise verändert sich die Passung zwischen Lerner und Medium, somit auch der Stellenwert der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf diese Passung und damit die Wirkweise insgesamt: Die zunächst hilfreiche instruktionale Gestaltung der Computeranimationen für den "Lernprozess des Lernenden" wird durch (Weiter-) Entwicklungen der mentalen Modellierungen des Individuums zu einem immer überflüssiger werdenden Werkzeug im "Arbeitsprozess des Experten".

Zu (2): Wie gehen Lernende mit Cognitive (Over-) Load um?

Sprachliche Strategien (nonverbal und verbal)

Lernende sind stets bestrebt, ihren Cognitive Load zu verringern. Dazu liefern sprachliche Strategien eine Möglichkeit. Insbesondere bei Aufgaben, die eine hohe Anzahl mentaler Behaltensprozesse erfordern, setzen Lernende

- ihre Hände zur Durchführung von unterstützenden Begleitbewegungen zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses ein.

Hierbei zeigen sich von dem *Durchführen kontinuierlicher Begleitbewegungen mit beiden Händen* über das *Andeuten einzelner Raum-Lage-Positionen mit nur einer Hand* bis zum *Andeuten einzelner Raum-Lage-Positionen mit nur einem Finger ("Fingertapping")* unterschiedliche Abstufungen des Rückgriffs auf das simultane Durchführen und Beobachten eigener Handlungen und damit die *Verkürzung von eigenen Handlungen*.

- begleitendes Sprechen als unterstützende "Ankerpunkte" für das Denken und zur Auslagerung, Vergegenwärtigung und Vergegenständlichung und dadurch zur Reduktion der kognitiven Anforderungen ein.

Hierbei zeigen sich von dem *begleitenden Sprechen in ganzen Sätzen* über das *sprachliche Andeuten durch einzelne Worte ("Da, da, da, ...")* bis zum *akustischen Andeuten durch einzelne Laute ("Hm, hm, hm, ...")* – Akustische Merkmale äquivalent zum "Fingertapping" – unterschiedliche Abstufungen der *Verkürzung der eigenen Sprache*.

Strategien bei einer rein mentalen Vorgehensweise

Zur Reduktion kognitiver Belastung bzw. zur prophylaktischen Vermeidung von Cognitive (Over-) Load-Situationen verwenden Lernende neben der grundsätzlichen Strategie "Zentralität der gewählten Grundfläche im Netz" die beiden Strategien "Auswendig-Wissen mit Reduktionsstrategie" (durch dynamisch-mentale Rückführungen) sowie "Auswendig-Wissen" (durch propositionale statische Zuordnungen).

Strategien bei einer Vorgehensweise mit Computeranimationen

Computeranimationen können Lernenden *äußere* sowie *innere* orientierende Unterstützung *für* und *während* mentale(r) Modellierungsprozesse bieten. Dadurch werden die kognitiven Anforderungen und somit die kognitive Belastung reduziert.

Die *äußere* Unterstützung habe ich bereits unter Punkt (1) ausführlich dargestellt. Eine *innere* Unterstützung kann *während* der mentalen Modellierungsprozesse insbesondere durch "mental gespeicherte Bewegungsroutinen" erfolgen. Diese "inneren Abbilder äußerer Prozesse" liefern entweder direkt die Problemlösung oder dienen dem Lernenden zur "mental Beobachtung" als unterstützende *innere* Hilfe bei einer eigenständigen Modellierung.

Zu der hier scheinbar vorgenommenen Unterscheidung zwischen *Innerem* und *Mentalem* sei angemerkt: Es begegnen sich hier lediglich Begriffshintergründe zweier unterschiedlicher Kulturen, der Wahrnehmungspsychologie und der Kognitionspsychologie. Inhaltlich sind diese Begriffe auf einer gemeinsamen Ebene zu verstehen: Die *innere* Unterstützung bei der Konstruktion von *mental Modellen* beschreibt letztlich nur, durch welche geistigen Operationen ein mentales Modell konstruiert wird.

Bewertungen der einzelnen Medien – Bewusste Stärkung der Lernenden in ihren Vorgehens- und Verhaltensweisen und ihrer Mediennutzung

Hier noch einmal zusammenfassend die einschlägigen Kriterien: Passungsprobleme zwischen Medium und Lernendem im Entwicklungsprozess als mögliche Folge von

- den kognitiven Anforderungen des simultanen Handelns und Beobachtens,
- fehlenden Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten,
- zu hoher Darstellungsflüchtigkeit,
- fehlenden Visualisierungsmöglichkeiten.

Im Gegensatz zu einer möglichen "naiven Computergläubigkeit" der Lernenden konnte insgesamt ein recht hohes Reflektionsvermögen im Hinblick auf die kritische Auseinandersetzung mit dem Computer als Medium festgestellt werden. Lehrende sollten daher Vertrauen in die Selbstständigkeit der Lernenden bei ihrer eigenen Medienwahl haben und keine "Medienverwendung im Gleichschritt" anstreben. Auch zehnjährige Kinder können sehr wohl eigene Entscheidungen in Bezug auf die für sie selbst jeweils "richtigen Medien" zum "richtigen Zeitpunkt" treffen. Darüber hinaus können in gemeinsamen Reflektionsphasen entwickelte Kriterien zu einer bewussten Mediennutzung weiter beitragen.

Zudem sollten sich Lehrende über die Bedeutung der Rückgriffsmöglichkeiten zur Unterstützung der Lernenden bewusst sein, diese bereithalten und die Lernenden gezielt in ihren Vorgehens- und Verhaltensweisen im Umgang mit Cognitive-Load (Strategien bei der Positionierung der G-Fläche, Begleitbewegungen, Sprachverwendungen) stärken.

Die unter dem übergeordneten Punkt (3) genannten Ergebnisse wurden in der bisherigen Ergebnisdarstellung bereits deutlich. Da sie wesentlich für die im nächsten Kapitel zu erörternden Konsequenzen sind, gehe ich dort (Kapitel 5.2) weiter auf sie ein.

5 Konsequenzen und Ausblick

5.1 Entwicklung einer Lernumgebung zur Förderung des räumlichen Vorstellungsvermögens – Inter-Netzzo

Der Fall "Jan" konnte exemplarisch zeigen, dass Lernende sich unabhängig von den verwendeten Medien bei den "herkömmlichen" Aufgabenstellungen zu den (Würfel-) Netzen zunehmend von ihren mentalen Modellierungen lösen und diese durch propositionale Repräsentationen ersetzen. Jan merkt sich dabei Paare von Netzen und zugehörigen Ja-Nein-Entscheidungen, so dass er bei vielen Netzen ohne jegliche Form des Faltens darüber befinden kann, ob ein Netz ein Würfelnetz ist oder nicht.

Es stellt sich die Frage: Wie können Lernende wie Jan dazu gebracht werden, dass sie weiterhin mentale Modellierungen ausüben?

Geht es um die Entwicklung und Förderung der Raum-Vorstellung, so wird für die konkrete *Handlungsebene* stets betont, durch geeignete Aufgabenstellungen Verbindungen zu schaffen – von der *Geometrie in der Ebene* in die *Geometrie des Raumes* – sowie umgekehrt (vgl. etwa Franke, 2000, S.137f).

Für die *Vorstellungsebene* hingegen lässt sich beobachten, dass diese Forderung weit weniger konsequent verfolgt wird: Werden Aufgabenstellungen, die losgelöst von konkret durchzuführenden Handlungen auf der Vorstellungsebene bearbeitet werden sollen, überhaupt raum-vorstellend bearbeitet? Ermöglichen bzw. legen derartige Aufgaben Vorgehensweisen in *beide* Richtungen nahe? Wie viel Raum-Vorstellung benötigt man tatsächlich für sogenannte Raumvorstellungs-Aufgaben?

Hinter diesen Fragen verbergen sich Anforderungen an das Design einer Lernumgebung: *Welche* Raumvorstellungsaufgaben erfordern Raum-Vorstellung? Bezogen auf die Thematik *Netze und Körper* bedeutet dies: Das Aufgabendesign muss gewährleisten, dass 1. Lernende *überhaupt im Kopf falten* und 2. *Vorgehensweisen des mentalen Zusammen- und Auseinanderfaltens* nachhaltig motiviert werden.

Als Konsequenz aus dieser Tatsache habe ich die Lernumgebung "Inter-Netzzo" entwickelt, die diese beiden Ziele verfolgt (vgl. Huhmann 2006; Huhmann 2011; Huhmann 2012 und Huhmann in Druck).

5.2 "Operatives Beobachten"

5.2.1 Ein Plädoyer für gezielte unterrichtliche Phasen zur Entwicklung des "Operativen Beobachtens"

Wenn Lehrpersonen bewusst ist, dass Lernende durch Cognitive-Overload in ihrem Lernfortschritt gehemmt werden können, und sie erheben können, wodurch und wann Cognitive Load übermäßig erzeugt wird, dann haben sie Möglichkeiten, diesem Overload vorzubeugen, indem sie die Lernumgebung durch den gezielten Einsatz von Fremdhandlern (Animationen durch Lehrer, Mitschüler, Computer, Abbildungen), die in späteren Phasen von Lernprozessen als Rückgriffsmöglichkeiten dienen können, entsprechend gestalten.

Cognitive (Over-) Load-Probleme sind zu erwarten, wenn die kognitiven Anforderungen des simultanen Handelns und Beobachtens an Lernende gestellt werden. Als wesentliche Konsequenz für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen ergibt sich daraus der Einsatz von Fremdhandlern in bewusst eingebundenen Arbeits- und Reflexionsphasen zur Entwicklung des reinen Beobachtens von Handlungen.

Diese Entwicklung des reinen Beobachtens animierter Handlungen durch Fremdhandler (im Folgenden "Operatives Beobachten") kann als mögliche Vorstufe des simultanen Durchführens und Beobachtens eigener Handlungen (im Folgenden "Operatives Handeln") insbesondere Lernenden, die durch die kognitiven Mehranforderungen hierbei überfordert sind, einen ersten Zugang zu lernrelevanten Planungs- und Analyseprozessen zur Entwicklung mentaler Repräsentationen ermöglichen.

Der Prozess der sich entwickelnden, zunehmend zielgerichteten Beobachtung aus dem zunächst weitgehend hypothesenfreien Zusehen / Betrachten, lässt sich durch die beiden folgenden Charakteristika näher beschreiben:

1. Die Struktur von Beobachtungs- und Analyseprozessen – Iterative Phasen des Beobachtens:

Insgesamt kennzeichnet sich die Struktur von Beobachtungs- und Analyseprozessen durch iterative Phasen des Beobachtens, des Verarbeitens und Reflektierens des Beobachteten, Phasen des mentalen Modellierens und Phasen des Validierens von Hypothesen durch Neuanwendung auf die Beobachtung

der Fremdhandlung. Kurz: Beobachtung und Analyse, Modellkonstruktion / -variation, Beobachtung und Analyse, Modellkonstruktion / -variation sowie Iterationen dieser Phasen.

2. Die Entwicklung von Beobachtungs- und Analyseprozessen – Präzisierung des Beobachtens:

Vom zunächst weitgehend hypothesenfreien Zusehen / Betrachten über das rezipierende Beobachten zum analysierenden operativen Beobachten werden die Beobachtungen zunehmend fokussierter.

1. Schritt: "Innere Abbilder äußerer Prozesse": Mentale Modellierung als Bewegungs-Film ohne (bzw. mit wenigen) bewusste(n) funktionale(n) Zuordnungen.

2. Schritt: Elaborierter werdende Beobachtungen durch Variationen des Aufmerksamkeitsfokus und erste Merkmalsanalysen (zunehmende Trennung von "Wichtigem" und "Unwichtigem").

3. Schritt: Modellkonstruktion und -variation ...

Der Lernende entwickelt seine mentale Modellierung zunehmend weiter. Hierdurch werden zugleich die Analyseanteile in den Beobachtungsphasen stärker, präziser und kürzer. Dieses charakterisiert wiederum die Entwicklung des analysierenden Beobachtens aus dem rezipierenden Beobachten.

Insgesamt wird in diesen Entwicklungsphasen des Beobachtens der "wahrgenommene Detailreichtum der Fremdhandlung" sowie der "Detailreichtum der jeweils bis dahin entwickelten aktuellen mentalen Repräsentationen" zunehmend "ausgeblendet" und geht zugunsten von "struktureller Erkenntnis" verloren. Hierin verdeutlicht sich der Wechselwirkungszusammenhang zwischen der Entwicklung mentaler Repräsentationen und der Entwicklung der Beobachtungs- und Analyseprozesse: Der "Detailreichtum mentaler Repräsentationen" nimmt ab, diese werden dadurch schematischer, während zugleich durch "strukturelle Erkenntnisse des Lernenden" (Merkmale: Analyse funktionaler Zusammenhänge, Zuordnungen von Eigenschaften, symbolische Zuordnungen) die Analyseanteile in den (konkreten) Beobachtungsphasen stärker, präziser und kürzer werden und damit die Qualität der Informationen brauchbarer und wertvoller wird.

Im Rahmen von Unterrichtsgesprächen sollten diese Phasen durch Lehrende orientierend, strukturierend und reflektierend begleitet werden. Durch gezielte Arbeits- und Reflexionsphasen können Lernende das an konkreten Objekten und Handlungen erworbene "Operative Beobachten" auch auf mentale Objekte und Handlungen übertragen. "Operatives Beobachten" umfasst somit sowohl "Konkretes" als auch "Mentales" Beobachten.

So können Fremdhandler für Lernende einen Beitrag zur aktiven und selbstständigen Durchführung mentaler Simulationsprozesse leisten. Dadurch können auch Lernende, die durch simultanes Handeln und Beobachten überfordert sind, mehr und mehr die Rolle der zielgerichtet (mental) handelnden Akteure einnehmen.

Das zentrale Merkmal, das Fremdhandler erfüllen sollten, lautet: Fremdhandler müssen zielgerichtet handeln können. Mit Blick auf die zunehmende Expertise von Lernenden sollten zur "bestmöglichen" Gewährung der Passung zwischen Individuum und Medium und damit zur Vermeidung von überflüssigem Extraneous Cognitive Load folgende Mindestanforderungen berücksichtigt werden:

1. **Vormachen**

Dem Lernenden sollte Zeit gegeben werden, um Entwicklungsprozesse des Beobachtens zu vollziehen.

2. **Vormachen – Selber stoppen – Operativ Handeln und Beobachten durch den Lernenden – Weiter Vormachen**

Für den Lernenden sollten Einfluss- und Explorationsmöglichkeiten geschaffen werden. Der Aufmerksamkeitsfokus kann dadurch selbstständig gewählt und generierte Hypothesen können überprüft und ggf. weiterentwickelt werden.

3. **Selber machen**

Den Lernenden sollte die Benutzersteuerung und damit die kognitiven Anforderungen des Handelns *"vollständig übergeben"* werden.

Zur Unterstützung sollte jeder dieser Modi von dem Lehrenden durch Analyse- und Reflexionsgespräche begleitet werden. Insgesamt liegt der Fokus hier bewusst auf der Formulierung von Mindestanforderungen: Die Berücksichtigung der mediengestalterischen Aspekte ist zwar notwendig, nicht aber hinreichend. Erst die Berücksichtigung der herausgearbeiteten fachdidaktischen Aspekte liefert das ausschlaggebende und hinreichende Kriterium zur Charakterisierung der Fremdhandler.

5.2.2 Ein Plädoyer für die erweiterte begriffliche Fassung des "Operativen Prinzips" in der Mathematikdidaktik unter explizitem Einbezug des "Operativen Beobachtens"

In Kapitel 1.2.3 ab S. 29 habe ich Wittmanns Interpretation des "Operativen Prinzips" für die Mathematikdidaktik dargestellt. Im Folgenden betrachte ich einmal die entsprechenden Auszüge in unterschiedlichen Auflagen seines Lehrbuches "Grundfragen des Mathematikunterrichts".

In der 1. Auflage von 1974 ist zu lesen:

„Es ist darauf hinzuarbeiten, daß die aus Handlungen (durch Verinnerlichung) erwachsenden Operationen sich in Gruppierungen organisieren (operatives Prinzip). Im Rahmen operatorischer Übungen (Aebli (1963), S. 109-113) kann zielstrebig und systematisch im Sinne des operativen Prinzips gearbeitet werden (Durcharbeitung der Operationen).“ (Wittmann 1974)

In der 3.- 5. Auflage:

„Es ist darauf hinzuarbeiten, daß die aus Handlungen (durch Verinnerlichung) erwachsenden Operationen sich in Gruppierungen organisieren, und daß das Verhalten von Eigenschaften, Relationen und Funktionen bei Operationen beobachtet wird gemäß der Frage: „Was geschieht mit ..., wenn ...?““ (Wittmann 1976)

Ab der 6. Auflage:

„Aufgabe des Lehrers ist es, die jeweils untersuchten Objekte und das System („Gruppierung“) der an ihnen ausführbaren Operationen deutlich werden zu lassen und die Schüler auf das Verhalten der Eigenschaften, Beziehungen und Funktionen der Objekte bei den transformierenden Operationen gemäß der Frage „Was geschieht mit ..., wenn ...?“ hinzulenken.“ (Wittmann 1981)

Während es bei den Formulierungen der 1. – 5. Auflagen („Es ist darauf hinzuarbeiten“) noch unbenannt bleibt, wie das "Darauf-Hinzuarbeiten" zu organisieren sei, verdeutlicht die überarbeitete Fassung ab der 6. Auflage („Aufgabe des Lehrers ist es ... hinzulenken“), dass die grundsätzliche Strukturierung von "operativen Lehr-Lernsituationen" und die Orientierung der Lernenden mehr Lenkung, mehr An-Leitung bedürfe und in der Hand der Lehrpersonen liege. – Man begann, wieder die Möglichkeit zum Einwirken durch Unterweisungen zu akzeptieren (vgl. Bender 1991, S. 51).

Es wird deutlich, dass das "Operative Prinzip" im engen Kontext des "Simultanen Handelns und Beobachtens" und der damit verbundenen kognitiven Anforderungen steht. Im Einklang mit den Erkenntnissen der Psychologie (Piaget, Aebli) wird hierbei insbesondere dem eigenen Handeln ein fundamentaler Charakter zugeschrieben, dadurch, dass durch das Handeln – aus dem Handeln heraus (durch Verinnerlichung) Operationen erwachsen. Im Zentrum des "Operativen Prinzips" steht also das zunehmend zielgerichtete "simultane Handeln und Beobachten" ("Operatives Handeln"). Auch andere Autoren (bspw. Krauthausen 1995; Scherer 2006; Selter 1997; Winter 1984; ...) zum Themenfeld "Operatives Prinzip", "Operative Übungsformen" verdeutlichen (implizit) diesen Zusammenhang.

Die Stellung des zunehmend zielgerichteten "reinen Konkreten Beobachtens von Handlungen" bleibt jedoch im Rahmen der bisherigen begrifflichen Fassung des "Operativen Prinzips" unklar. Außerdem deutet sich ein Defizit im Hinblick auf die Erfassung des "Mentalen Beobachtens" durch das bisherige Begriffsverständnis zum "Operativen Prinzip" an ("Operatives Beobachten" – "Konkretes und Mentales Beobachten").

In der Literatur wird zwar beschrieben, dass kognitive Entwicklungsprozesse ausgehend von der Ausführung realer Handlungen bis zur Bildung eines mentalen, beweglichen Systems von Operationen und Begriffen stattfinden und wie sie sich (fach-) didaktisch induzieren lassen. Wie diese *Prozesse des Verinnerlichens* jedoch konkret verlaufen, welche kognitiven Anforderungen dabei an die Lernenden gestellt werden und welche Wechselwirkungen und mediale Einflussfaktoren darauf wie einwirken, bleibt außerhalb der Betrachtung.

Wenn es um "Operatives Handeln" geht, wird scheinbar wie selbstverständlich davon ausgegangen, dass man *beobachten kann*, was passiert, wenn Einwirkungen auf ein Objekt ausgeübt werden. Das "Operative Handeln" basiert dann auf dieser Grundlage. Im Zentrum von (und für mehrere Lernende auch vor-) dem "Operativen Handeln" steht jedoch zunächst einmal das "Operative Beobachten" – "Operatives Beobachten" als eine notwendige Voraussetzung für "Operatives Handeln".

"Operatives Beobachten und Analysieren" will gelernt sein, will "schrittweise" aus dem weitgehend hypothesenfreien Zusehen/ Betrachten über Merkmale, wie Auffälligkeiten, Unterschiede, Gemeinsamkeiten, Aufmerksamkeitsverlagerungen, zum re-

zipierenden Beobachten und schließlich zum analysierenden Beobachten entwickelt werden.

Die Fähigkeit des merkmalsorientierten Analysierens basiert also auf den Fähigkeiten des zielgerichteten und reflektierten Beobachtens, bzw. auf den Fähigkeiten des zielgerichteten und reflektierten Handelns und Beobachtens. Diese Fähigkeiten werden mit dem konstruktivistischen Zug des "Operativen Prinzips" implizit weitgehend vorausgesetzt, das heißt, die Theorie des "Operativen Prinzips" setzt erst an dieser Stelle an, wobei die Entwicklung dieser Fähigkeiten selbst schon Ziele und damit erst die Voraussetzung für Denk- und Vorstellungsentwicklung im Sinne des "Operativen Prinzips" darstellen.

Hier sei auch noch einmal an die Gefahr des „blinden Handelns“ (Hole 1973) erinnert. In Analogie dazu könnte man etwa bei einem bloßen Zusehen, von der Gefahr des "blinden Beobachtens" reden (Begriffspaar Zusehen – Beobachten).

Viele Lernende leisten die kognitiven Anforderungen, die beim *"simultanen Durchführen und Beobachten einer eigenen Handlung"* an sie gestellt werden ("Operatives Handeln") und sind in der Lage, die oben beschriebenen Fähigkeiten *dabei – dadurch – mitzuentwickeln*.

Hingegen kann Lernenden, die überfordert sind und im Sinne bloßer Handlungen oder bloßem Zusehens „blind handeln“, oder "blind beobachten", dadurch geholfen sein, dass durch das "reine Beobachten von Fremdhandlungen" die kognitiven Anforderungen erst einmal reduziert werden.

Durch den gezielten unterrichtlichen Einsatz von Arbeits- und Reflexions-Phasen zur Entwicklung des "Operativen Beobachtens" können diese Lernenden Zugang zur Analyse finden. Hierbei strukturieren jeweils die Fremdhandler die Handlung, und der Lernende kann dadurch Entwicklungsprozesse zum operativen Beobachter dieser Fremdhandlungen vollziehen.

Das Plädoyer für die erweiterte begriffliche Fassung des "Operativen Prinzips" in der Mathematikdidaktik knüpft somit direkt an die vorgenannten Ausführungen zu den Phasen der Entwicklung des "Operativen Beobachtens" an und fokussiert den *separaten Stellenwert der Entwicklung des "Operativen Beobachtens" als mögliche Vorstufe und zugleich Teil des "Operativen Handelns"*.

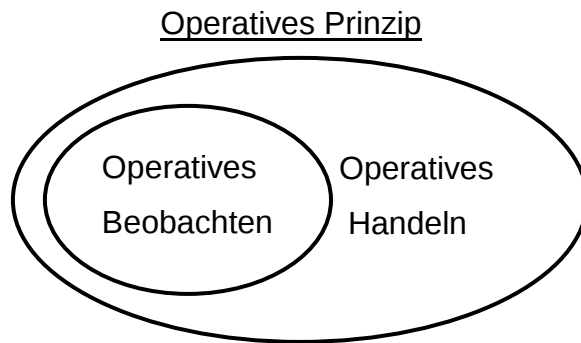


Abbildung 27: Zusammenhänge der Komponenten des "Operativen Prinzips"

"Operatives Beobachten" umfasst hierbei die zielgerichtete "Konkrete und Mentale Beobachtung" entstehender Auswirkungen aufgrund vorgenommener Einwirkungen, wobei das Einwirken von einem Fremdhandler ausgeübt wird.

"Operatives Handeln" umfasst das zielgerichtete eigenständige "simultane Handeln und Beobachten" und beinhaltet über die kognitiven Anforderungen des "Operativen Beobachtens" hinaus die simultanen Mehranforderungen der Handlungsplanung und -durchführung.

5.3 Erweiterter Vorstellungsbegriff – ein Vorschlag

Im Folgenden stütze ich mich auf Weber (2007). Er unterscheidet einen denkpsychologischen und einen lernpsychologischen Vorstellungsbegriff.

„Denkpsychologischer Vorstellungsbegriff:

Vorstellungen und Vorstellen treten im Zusammenhang mit Gedanken und Denken auf, und zwar in einem dualistischen Sinne:

- Ausgehend von der Wahrnehmung realer Sachverhalte und von eigenen Handlungen werden durch Verinnerlichung Vorstellungsbilder – kurz: Vorstellungen aufgebaut. Sie können visueller, aber auch taktiler oder auditiver Natur sein.
- Dadurch wird Vorstellungshandeln, das heißt gedankliches Bearbeiten und Bewegen – kurz: Vorstellen – möglich“ (vgl. ebd., S. 128/129).

„Lernpsychologischer Vorstellungsbegriff:

Vorstellungen und Vorstellen spielen im Zusammenhang mit Lernen von Mathematik folgende Rollen:

- Vorstellungen und Vorstellen knüpfen an bekannte Bild- und Handlungszusammenhänge an.

- Vorstellungen und Vorstellen liegen nicht nur mathematischen Begriffen und Verfahren zu Grunde, sondern mathematische Inhalte beeinflussen die Vorstellungen auch.
- Vorstellungen und Vorstellen sind nicht nur von singulären, sie können auch von regulärem Charakter sein“ (vgl. ebd., S. 130/131).

Mein Erweiterungsvorschlag knüpft an den denkpsychologischen Vorstellungsbegriff an. Vorstellung, wie sie in dieser Deutung nach Weber dargelegt wird, ist bewusste Vorstellung im Sinne von Vorstellungsbildern und eines aktiven Vorstellungshandelns: „Der aktive und konstruktive Charakter von Vorstellung wird durch die Formulierung des Aufbaus von Vorstellungen und des Vorstellens als Vorstellungshandeln hervorgehoben. Vorstellungsbilder sind Objekte, die durch Vorstellungshandlungen verändert werden können. Umgekehrt beeinflussen Vorstellungsbilder auch die Art und Weise, wie Vorstellungshandlungen aussehen – Vorstellungsbilder ermöglichen Vorstellungshandeln und bestimmen es dadurch“ (ebd., S. 129).

In meinen Analysen wurden unter anderem dynamische Vorstellungen in Form von mentalen Bewegungsroutinen charakterisiert. Über das Mentale Beobachten werden diese für die Entwicklung des Mentalen Handelns bedeutsam.

Mit dem Begriff der mentalen Bewegungsroutinen werden Schemata beschrieben, die aufgrund von memorierten Prozessen innerlich ablaufen, ohne dass der Lernende (zielgerichtet gedanklichen) Einfluss auf den Ablauf nimmt. Die mentale Aktivität besteht dabei in dem inneren Repräsentieren, also dem "Ablaufenlassen des Films", die Fähigkeit des aktiven Operierens mit dem gedanklichen Objekt im Sinne des *Vorstellungshandelns* wird dabei hingegen noch nicht benötigt.

Im Vergleich zu Webers denkpsychologischen Vorstellungsbegriff wird mit diesem hier gezeichneten Begriff der Vorstellung insgesamt davon ausgegangen, dass auch "ablaufende" Vorstellungsprozesse mit einbezogen sind, die kein "aktives" *Vorstellungshandeln* erfordern. Hierdurch wird die Bedeutung des "Mentalen Beobachtens der inneren Fremdhandler" berücksichtigt.

Basierend auf Webers Formulierungen des vorläufig bestimmten denkpsychologischen Vorstellungsbegriffes lege ich abschließend den folgenden Erweiterungsvorschlag zur Diskussion vor (Hervorhebungen durch Fettmarkierungen):

„Denkpsychologischer Vorstellungsbegriff:

Vorstellungen und Vorstellen treten im Zusammenhang mit Gedanken und Denken auf, und zwar in einem dualistischen Sinne:

- *Ausgehend von der Wahrnehmung realer Sachverhalte und von eigenen Handlungen werden durch Verinnerlichung Vorstellungsbilder **und Vorstellungsfilme** – kurz: Vorstellungen aufgebaut. Sie können **statisch- und dynamisch-** visueller, aber auch taktiler oder auditiver Natur sein.*
- *Dadurch wird Vorstellungshandeln, das heißt gedankliches Bearbeiten und Bewegen – kurz: Vorstellen – möglich“.*

6 Literaturverzeichnis

- Achtenhagen, F. (2000): *Kriterien für die Entwicklung komplexer Lehr-Lern-Arrangements*. In: Adick, C.; Kraul, M.; Wigger, L.; Menck, P. (Hg.): *Was ist Erziehungswissenschaft?* Festschrift für Peter Menck. 1. Aufl. Donauwörth: Auer, S. 165-188.
- Aebli, H. (1963): *Über die geistige Entwicklung des Kindes*. Stuttgart: Klett.
- Aebli, H. (1983): *Zwölf Grundformen des Lehrens. Eine allgemeine Didaktik auf psychologischer Grundlage*. 11. Aufl. 2001. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aebli, H. (1985): *Das operative Prinzip*. In: *mathematik lehren*, H. 11, S. 4-6.
- Anderson, J. R. (1976): *Language, memory and thought*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J. R. (1996): *Kognitionspsychologie*. 2. Aufl., [Übers. der 4. amerikan. Aufl.]. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Anderson, J. R.; Albert, A. (1989): *Kognitive Psychologie. Eine Einführung*. 2. Aufl. der dt. Ausg. Heidelberg: Spektrum-der-Wiss.-Verl.-Ges.
- Anderson, J. R.; Bower, G. H. (1973): *Human associative memory*. Washington: Winston and Sons.
- Atteslander, P. (1988): *Befragung*. In: Ammon, U.; Burkhardt, A.; Ungeheuer, G.; Wiegand, H. E.; Steger, H.; Brinker, K. (Hg.): *Sociolinguistics / Soziolinguistik*. Berlin/New York: de Gruyter, S. 940-951.
- Atteslander, P. (2006): *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 11. neu bearb. u. erw. A. Berlin: Schmidt.
- Bauersfeld, H. (1983): *Subjektive Erfahrungsbereiche als Grundlage einer Interaktionstheorie des Mathematiklernens und -lehrens*. In: Bauersfeld, H. (Hg.): *Lernen und Lehren von Mathematik. Untersuchungen zum Mathematikunterricht*. Köln: Aulis Verlag Deubner, S. 1-56.

- Baxter, J. H.; Preece, P. F. W. (1999): "Interactive multimedia and concrete three-dimensional modelling". In: *Journal of Computer Assisted Learning*, Jg. 15, H. 4, S. 323-331.
- Beck, C.; Maier, H. (1993): *Das Interview in der mathematikdidaktischen Forschung*. In: *Journal für Mathematikdidaktik*, Jg. 14, H. 2, S. 147-179.
- Bender, P. (1991): *Ausbildung von Grundvorstellungen und Grundverständnissen - ein tragendes Konzept für den Mathematikunterricht - erläutert an Beispielen aus dem Sekundarstufenbereich*. In: Postel, H.; Kirsch, A.; Griesel, H. (Hg.): *Mathematik lehren und lernen*. Festschrift für Heinz Griesel. Hannover: Schroedel, S. 48-60.
- Bender, P.; Schreiber, A. (1985): *Operative Genese der Geometrie*. Wien/Stuttgart: hpt/Teubner.
- Besuden, H. (1980): *Motivation und operatives Prinzip im Geometrieunterricht der Sek. I*. In: *Beiträge zum Mathematikunterricht*. Hannover: Schroedel.
- Boucheix, J. M. (2008): *Young learners' control of technical animations*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation*. Research implications for design. New York: Cambridge Univ. Press, S. 208-235.
- Bruner, J. S. (1971): *Über kognitive Entwicklung*. In: Bruner, J. S.; Olver, R. R.; Greenfield, P. M. (Hg.): *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Stuttgart: Klett, S. 21-53.
- Bruner, J. S.; Olver, R. R.; Greenfield, P. M. (1971): *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Stuttgart: Klett.
- Brünken, R.; Leutner D. (2008): *Lernen mit Medien*. In: Schneider, W.; Hasselhorn, M. (Hg.): *Handbuch der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe, S. 551-562.
- Brünken, R.; Seufert, T.; Jänen, I. (2008): *Multimodales Lernen*. In: Mandl, H.; Zumbach, J. (Hg.): *Pädagogische Psychologie in Theorie und Praxis. Ein fallbasiertes Lehrbuch*. Göttingen: Hogrefe, S. 133-140.

- Brünken, R.; Seufert, T.; Leutner, D. (2008): *Lernen und Lehren mit neuen Medien*. In: Renkl, A. (Hg.): *Lehrbuch Pädagogische Psychologie*. 1. Aufl. Bern: Huber, S. 299-338.
- Brünken, R.; Steinbacher, S.; Leutner, D. (2000): *Räumliches Vorstellungsvermögen und Lernen mit Multimedia*. In: Brünken, R.; Leutner, D. (Hg.): *Neue Medien in Unterricht, Aus- und Weiterbildung*. Aktuelle Ergebnisse empirischer pädagogischer Forschung. Münster [u.a]: Waxmann, S. 37-46.
- Chandler, P.; Sweller, J. (1991): *Cognitive load theory and the format of instruction*. In: *Cognition and Instruction*, Jg. 8, H. 4, S. 293-332.
- Chandler, P.; Sweller, J. (1992): *The split-attention effect as a factor in the design of instruction*. In: *British Journal of Educational Psychology*, H. 62, S. 233-246.
- Chi, M. T. H.; Glaser, R.; Rees, E. (1983): *Expertise in problem-solving*. In: Sternberg, R. J. (Hg.): *Advances in the psychology of human intelligence*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum, S. 7-76.
- Chi, M. T. H.; Leeuw, M.; Chiu, H.; Lavancher, C. de (1994): *Eliciting self-explanations improves understanding*. In: *Cognitive Science*, H. 18, S. 439-477.
- Christel, M. G. (1994): *The role of visual fidelity in computer-based instruction*. In: *Human-Computer Interaction*, Jg. 2, H. 9, S. 183-223.
- Clark, J. M.; Paivio, A. (1991): *Dual coding theory and education*. In: *Educational Psychology Review*, Jg. 3, H. 3, S. 149-170.
- Craig, S.; Gholson, B.; Driscoll, D. D. (2002): *Animated pedagogical agents in multimedia educational environments: Effects of agent properties, picture features, and redundancy*. In: *Journal of Educational Psychology*, H. 94, S. 428-434.
- Craik, F. I. M.; Lockhart, R. S. (1972): *Levels of processing: A framework for memory research*. In: *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, H. 11, S. 671-684.
- Craik, K. (1943): *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Diekmann, A. (2005): *Empirische Sozialforschung. Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. 14. Auflage. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Dilthey, W. (1958): *Die geistige Welt. Einleitung in die Philosophie des Lebens*. 2. Aufl. Stuttgart und Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht.
- Dörfler, W. (1988): *Kognitive Aspekte mathematischer Begriffsentwicklung: Arbeiten aus dem Projekt "Entwicklung formaler Qualifikationen im Mathematikunterricht"*. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky [u.a.], S. 55-125.
- Dorval, M.; Pépin, M. (1986): *Effect of Playing a Video Game on a Measure of Spatial Visualization*. In: *Perceptual and Motor Skills*, H. 62, S. 159-162.
- Eisler, R. (Hg.) (1904): *Wörterbuch der philosophischen Begriffe*. Erste Ausgabe: Berlin 1899. Hier nach der zweiten, völlig neu bearbeiteten Auflage. Books On Demand 2010.
- El Koussy, A. A. (1935): *An investigation into the factors in tests involving the visual perception of space*. In: *British Journal of Psychology Monograph Supplement*, H. 20.
- Faber, J.; Meiers, T.; Ruschin, D.; Seyferth, A. (1991): *The motion picture in interactive information systems: A necessary or facilitating component?* In: Bullinger, H. J. (Hg.): *Human aspects in computing: Design and use of interactive systems and work with terminals*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., S. 485-490.
- Farah, M. J. (1988): *Is Visual Imagery Really Visual? Overlooked evidence from neuropsychology*. In: *Psychological Review*, H. 95, S. 307-317.
- Farah, M. J. (1995): *The neural bases of mental imagery*. In: Gazzaniga, M. S. (Hg.): *The cognitive neurosciences*. Cambridge, Mass.: MIT Press, S. 959-961.
- Forsyth, A. S., JR.; & Lancy, D. F. (1987): *Simulated travel and place location learning in a computer adventure game*. In: *Journal of Educational Computing Research*, H. 3, S. 377-394.
- Franke, M. (2000): *Didaktik der Geometrie*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.

- Franke, M. (2007): *Didaktik der Geometrie in der Grundschule*. 1. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Freudenthal, H. (1973): *Mathematics as an educational task*. Dordrecht: Reidel.
- Fricke, R. (1991): *Zur Effektivität computer- und videounterstützter Lernprogramme. Arbeiten aus dem Seminar für Pädagogik der TU Braunschweig, Bericht Nr. 1/91*. Ebenfalls erschienen in: Jäger u.a. (1991), (Hrsg.): *Computerunterstütztes Lernen*. Beiheft 2 zur Zeitschrift *Empirische Pädagogik*. Landau: Empirische Pädagogik, 167-204.
- Friedrichs, J. (1973): *Methoden empirischer Sozialforschung*. Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Frostig, M.; Maslow, P. (1978): *Lernprobleme in der Schule*. 1. Aufl. Stuttgart: Hippokrates-Verl.
- Gagnon, D. (1985): *Videogames and spatial skills: An exploratory study*. In: *Educational Communication and Technology*, Jg. 23, H. 4, S. 263-275.
- Galperin, P. J. (1969): *Die Entwicklung der Untersuchungen über die Bildung geistiger Operationen*. In: Hiebsch (Hg.): *Ergebnisse der sowjetischen Psychologie*. Stuttgart: Klett, S. 367-405.
- Galperin, P. J. (1974): *Die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen*. In: Galperin, P. J.; Leontjew A. N. (Hg.): *Probleme der Lerntheorie*. 4. Aufl. Berlin-Ost: Volk und Wissen, S. 33-49.
- Galperin, P. J.; Saporoshez, A. W.; Elkonin, D. B. (1974): *Probleme des Erwerbs von Kenntnissen und Fertigkeiten und neue Unterrichtsmethoden in der Schule*. In: Galperin, P. J.; Leontjew A. N. (Hg.): *Probleme der Lerntheorie*. 4. Aufl. Berlin-Ost: Volk und Wissen, S. 66-81 .
- Gardner, H. (1991): *Abschied IQ: die Rahmentheorie der vielfachen Intelligenzen*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Gardner, H. (1998): *Abschied vom IQ. Die Rahmen-Theorie der vielfachen Intelligenzen*. 2. Aufl. Stuttgart: Klett-Cotta.

- Genter, D.; Stevens A. L. (1983): *Mental Models*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Girwidz, R.; Rubitzko, T.; Spannagel, C. (2004): *Animationen in multimedialen Lernumgebungen*. In: Nordmeier, V. (Hg.): *Didaktik der Physik*. Beiträge zur Frühjahrstagung Düsseldorf 2004. Berlin: Lehmanns Media LOB.de .
- Glaser, B. G.; Strauss, A. L. (1998): *Grounded theory. Strategien qualitativer Forschung*. 1. Aufl. Bern: Huber.
- Green, C. S.; Bavelier, D. (2003): *Action video game modifies visual selective attention*. In: *Nature*, H. 423, S. 534-538.
- Greenfield, P. M.; Brannon, C.; Lohr, D. (1994): *Two- dimensional representation of movement through three-dimensional space: The role of video game expertise*. In: *Journal of Applied Developmental Psychology*, H. 15, S. 2-12.
- Grunwald, M.; Beyer, L. (2001): *Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Basel: Birkhäuser.
- Guilford, J. P.; Hoepfner, R. (1976): *Analyse der Intelligenz*. Weinheim: Beltz.
- Harrass, N. (2007): *Computereinsatz im Arithmetikunterricht der Grundschule. Theoretische Grundlegung und empirische Forschung zum Üben mit Lernsoftware*. Bielefeld, Univ., Diss., 2007. Hildesheim: Franzbecker.
- Hegarty, M. (2004): *Dynamic visualizations and learning: Getting to the difficult questions*. *Learning and Instruction*, 14, S. 343-351.
- Hegarty, M.; Kriz, S. (2008): *Effects of knowledge and spatial ability on learning from animation*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation*. Research implications for design. New York: Cambridge Univ. Press, S. 3-25.
- Hellmich, F. & Hartmann, J. (2002a): *Materialgebundene versus computerunterstützte Förderung räumlicher Kompetenzen in der Grundschule*. In W. Peschek (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht 2002*. Hildesheim: Franzbecker, S. 211-214.

- Hellmich, F.; Hartmann, J. (2002b): *Aspekte einer Förderung räumlicher Kompetenzen im Geometrieunterricht Ergebnisse einer Trainingsstudie mit Sonderschülerinnen und -schülern*. In: ZDM, Jg. 34, H. 2, S. 56-61.
- Hoffer, A. R. (1977): *Mathematics Resource Project: Geometry and Visualization*. Pala Alto, USA: Creative Publications.
- Höffler, T. N.; Leutner, D. (2006): *Der Einfluss von Spatial Ability in einem Vergleich einer Animation mit einer Serie von Standbildern*. In: Lösel, F.; Bender, D. (Hg.): *45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Lengerich: Pabst Science Publishers .
- Hole, V. (1973): *Erfolgreicher Mathematikunterricht. Keine Angst vor seiner Planung, Durchfuehrung u. Beurteilung*. 11. Aufl. 1982. Freiburg i.Br.: Herder.
- Huhmann, T. (2006): *Im Kopf unterwegs zwischen Netzen, Schachteln und Würfeln*. In: Grundschule Mathematik 10/2006, Friedrich Verlag, S. 28-31.
- Huhmann, T. (2011): *Zwischen Netzen, Schachteln und Würfeln – Die Inter-Netzzo-Werkstatt*. In: Praxis Grundschule 5/2011, Westermann Verlag, S. 46-55.
- Huhmann, T. (2012): *Haus 7 – Gute Aufgaben. Modul 7.5: Inter-Netzzo*.
Fortbildungsmaterial unter: <http://www.pikas.tu-dortmund.de/material-pik/herausfordernde-lernangebote/haus-7-fortbildungs-material/modul-7.5-inter-netzzo/index.html>
Unterrichtsmaterial unter: <http://www.pikas.tu-dortmund.de/material-pik/herausfordernde-lernangebote/haus-7-unterrichts-material/inter-netzzo/index.html> (Stand: 15.01.2010)
- Huhmann, T. (in Druck): *Im Kopf unterwegs zwischen Netzen, Schachteln und Würfeln*. In: Grundschule Mathematik - Sammelband "Spiele im Mathematikunterricht". Seelze 2012. S. 48-51.
- Ilgner, K. (1982): *Die Entwicklung des räumlichen Vorstellungsvermögens bei Schülern*. Berlin: Preprint.

- Internet-Plattform Mathematikus: *Modul „Würfelnetze“*. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. K.-P. Eichler. PH Schwäbisch Gmünd. Online verfügbar unter <http://www.mathematikus.de/>, zuletzt besucht am 16.01.2012.
- Issing, L. J. (1988): *Wissensvermittlung mit Medien. Wissenspsychologie*. In: Mandl, H.; Spada, H. (Hg.): *Wissenspsychologie*. München, Weinheim: Psychologie-Verl.-Union, S. 531-553.
- Jöckel, S.; Reiss, K. (1999): *Analyse und Simulation von Problemlösestrategien bei räumlichen geometrischen Aufgaben*. In: Günther-Arndt, H. (Hg.): *Fachdidaktik als Zentrum professioneller Lehrerbildung*. Oldenburg: Oldenburger VorDrucke 387, S. 65-79.
- Johnson-Laird, P. N. (1989): *Mental models*. In: Posner, M. I. (Hg.): *Foundations of Cognitive Science*. Cambridge, Mass.: Bradford, MIT Press .
- Johnson-Laird, P. N. (2005): *Mental models in thought*. In: Holyoak, K.; Sternberg, R. J. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 179-212.
- Kalyuga, S. (2003): *Rapid assessment of learners' knowledge in adaptive learning environments*. In: Hoppe, U.; Verdejo, F.; Kay, J. (Hg.): *Artificial Intelligence in Education: Shaping the future of learning through intelligent technologies*. Amsterdam: IOS Press .
- Kalyuga, S. (2005): *Prior knowledge principle*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 325-337.
- Kalyuga, S.; Ayres, P.; Chandler, P.; Sweller, J. (2003): *The expertise reversal effect*. In: *Educational Psychologist*, Jg. 38, H. 1, S. 23-31.
- Keegan, D. (1986): *The Foundations of distance education*. London: Croom Helm.
- Kerres, M. (2001): *Multimediale und telemediale Lernumgebungen. Konzeption und Entwicklung*. 2., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg.

- Kintsch, W. (1998): *Comprehension. A paradigm for cognition*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Kirby, J. R. (2008): *Mental representations, cognitive strategies, and individual differences in learning with animation*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation*. Research implications for design. New York: Cambridge Univ. Press.
- Kosslyn, S. M. (1973): *Scanning Visual Images: Some Structural Implications*. In: *Perception and Psychophysics*, Jg. 14, H. 1, S. 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1975): *Information representation in visual images*. In: *Cognitive Psychology*, Jg. 7, H. 3, S. 341-370.
- Kosslyn, S. M. (1977): *Imagery and internal representation*. In: Rosch, E.; Lloyd, U. (Hg.): *Categories and cognition*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum .
- Kosslyn, S. M. (1980): *Image and mind*. 2. Aufl. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Kosslyn, S. M. (1981): *The Medium and the Message in Mental Imagery: A Theory*. In: *Psychological Review*, Jg. 88, H. 1, S. 46-66.
- Kosslyn, S. M. (1994): *Image and brain. The resolution of the imagery debate*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1995): *Introduction*. In: Gazzaniga, M. S. (Hg.): *The cognitive neurosciences*. Cambridge, Mass.: MIT Press .
- Kosslyn, S. M.; Behrmann, M.; Jeannerod, M. (1995): *The cognitive neuroscience of mental imagery*. In: *Neuropsychologia*, Jg. 33, H. 11, S. 1335-1344.
- Kosslyn, S. M.; Moulton, S. T. (2009): *Mental imagery and implicit memory*. In: Markman, K. D.; Klein, W. M. P.; Suhr, J. A. (Hg.): *Handbook of Imagination and Mental Simulation*. New York: Hove, S. 135-151.
- Kosslyn, S. M.; Shin, L. M. (1993): *Mental imagery, update*. In: Adelman, G.; Smith, B. H. (Hg.): *Neuroscience Year: Supplement to the Encyclopedia of Neuroscience*. Cambridge, Mass.: Birkhauser Boston.

- Krapp, A.; Weidenmann, B. (Hg.) (2001): *Pädagogische Psychologie. Eine Einführung*. 4. Aufl. Weinheim: PVU.
- Krauthausen, G. (1995): *Zahlenmauern im 2. Schuljahr - ein substantielles Übungsformat*. In: *Grundschulunterricht*, H. 10, S. 5-9.
- Krauthausen, G. (2008): *Wie weiter mit dem Computer im Mathematikunterricht der Grundschule?* In: *Beiträge zum Mathematikunterricht*, S. 207-210.
- Kulik, C.-L. C.; Kulik, J. A.; Schwalb, B. J. (1986): *The effectiveness of computer-based adult education: A meta-analysis*. In: *Journal of Educational Computing Research*, Jg. 2, H. 2, S. 235-252.
- Kulik, C.-L. C.; Kulik, J. A. (1989): *Meta-Analysis in Education*. *International Journal of Educational Research*, 13(3), 223-340.
- Kulik, C.-L. C.; Kulik, J. A. (1991): *Effectiveness of Computer-Based Instruction: An Updated Analysis*. In: *Computers in Human Behavior*, H. 7, S. 75-94.
- Kulik, J. A. (1994): *Meta-Analytic Studies of Findings on Computer-Based Instruction*. In: Eva L.; Baker; Harold F.; O'Neil (Hg.): *Technology Assessment in Education and Training*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, S. 9-33.
- Lamnek, S. (1995): *Qualitative Sozialforschung*. 3. Aufl. Weinheim: Psychologie-Verl.-Union; Beltz.
- Lamnek, S. (2005): *Qualitative Sozialforschung. Lehrbuch*. 4., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Beltz PVU.
- Lederman, S. J.; Klatzky, R. L. (1987): *Hand movements: a window into haptic object recognition*. In: *Cognitive Psychology*, H. 19, S. 342-368.
- Lederman, S. J.; Klatzky, R. L. (1996): *Action for perception: Manual exploratory movements for haptically processing objects and their features*. In: Wing, A.; Haggard, P.; Flanagan, R. (Hg.): *Hand and Brain: Neurophysiology and Psychology of Hand*. San Diego: Academic, S. 431-446.

- Leutner, D.; Kretschmar, R. (1988): *Veranschaulichung und Aktivierung: Überraschende Effekte zweier didaktischer Prinzipien*. In: Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 20 (3), S. 263-276.
- Lewalter, D. (1997a): *Kognitive Informationsverarbeitung beim Lernen mit computerpräsentierten statischen und dynamischen Illustrationen*. In: Unterrichtswissenschaft, H. 25, S. 207-222.
- Lewalter, D. (1997b): *Lernen mit Bildern und Animationen. Studie zum Einfluß von Lernermerkmalen auf die Effektivität von Illustrationen*. München, Univ., Diss., 1996. Münster: Waxmann.
- Lewalter, D. (2003): *Wer profitiert von Illustrationen? Untersuchungsbefunde zur Medienwirkung. Mitteilungen und Berichte aus dem Institut für Museumskunde*. In: Science Center, Technikmuseum, Öffentlichkeit, H. 26, S. 29-42.
- Linn, M. C.; Petersen, A. C. (1985): *Emergence and characterisation of gender differences in spatial abilities: A meta-analysis*. In: Child Development, Jg. 56, S. 1479-1498.
- Linn, M. C.; Petersen, A. C. (1986): *A meta-analysis of gender differences in spatial ability: Implications for mathematics and science achievement*. In: Hyde, J. Shibley; Linn, M. C. (Hg.): *The psychology of gender*. Advances through meta-analysis. Baltimore, Md: The Johns Hopkins Univ. Press, S. 67-101.
- Lowe, R. K. (1998): *Verarbeitungsanforderungen beim Verstehen komplexer animierter Bilder*. In: Zeitschrift für Pädagogische Psychologie (Bern/ Göttingen) 12 (1998) 2/3, S. 125-134.
- Lowe, R. K. (2003): *Animation and learning: Selective processing of information in dynamic graphics*. In: Learning and Instruction, H. 13, S. 157-176.
- Lowe, R. K. (2005): *Multimedia Learning of Meteorology*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 429-446.

- Lowe, R. K. (2008): *Learning from animation: Where to look, when to look*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation. Research implications for design*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.) (2008): *Learning with animation. Research implications for design*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Lowery, B. R.; Knirk, F. G. (1982): *Micro-computer videogames and spatial visualization acquisition*. In: *Journal of Educational Technology Systems*, H. 11, S. 155-166.
- Luria, A. R. (1992): *Das Gehirn in Aktion. Einführung in die Neuropsychologie*. Reinbek: Rowohlt.
- Maier, P. H. (1999): *Räumliches Vorstellungsvermögen. Ein theoretischer Abriß des Phänomens räumliches Vorstellungsvermögen; mit didaktischen Hinweisen für den Unterricht. Freiburg (Breisgau), Pädag. Hochsch., Diss., 1994. 1. Aufl. Donauwörth: Auer.*
- Mandler, J. M. (1992): *How to Build a Baby: II. Conceptual Primitives*. In: *Psychological Review*, Jg. 99, H. 4, S. 587-604.
- Manning, P. L. (1967): *Problems in interpreting interview data*. In: *Sociology and Social*, H. 51, S. 301-316.
- Marcus, N.; Cooper, M.; Sweller, J. (1996): *Understanding instructions*. In: *Journal of Educational Psychology*, H. 88, S. 49-63.
- Marmolin, H. (1991): *Multimedia from the Perspectives of Psychology*. In: Kjell Dahl, Lars (Hg.): *Multimedia. Systems, Interaction and Application*. Berlin: Springer, S. 39-54.
- Masendorf, F. (1993): *Die Förderung des räumlichen Vorstellens bei lernbehinderten Kindern durch Computerspiele*. In: *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, Jg. 7, H. 4, S. 209-213.

- Masendorf, F. (1994): *Förderungstypen des induktiven Denkens und des räumlichen Vorstellens bei lernbeeinträchtigten Kindern: Eine metatypologische Mehrstichproben-KFA*. In: *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, H. 41, S. 14-21.
- Masendorf, F.; Kullik, U.; Heyland, H. (1997): *Zur Trainierbarkeit des abstrakten Denkens bei lernbehinderten Schülern mittels eines computergestützten Bildplattensystems*. In: Masendorf, F. (Hg.): *Experimentelle Sonderpädagogik*. Ein Lehrbuch zur angewandten Forschung. Weinheim: Dt. Studien-Verl., S. 273-299.
- Matheland (1998): *Mathematik-Lernsoftware für die Grundschule. Teil 2: 3./4. Schuljahr. Arithmetik, Geometrie, Sachrechnen*. CD-Rom. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Mayer, R. E. (2001): *Multimedia learning*. New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (Hg.) (2005): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2008): *Research-Based Principles for Learning with Animation*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation*. Research implications for design. New York: Cambridge Univ. Press, S. 30-48.
- Mayer, R. E.; Chandler, P. (2001): *When learning is just a click away: does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages?* In: *Journal of Educational Psychology*, Jg. 93, H. 2, S. 390-397.
- Mayer, R. E.; Sims, V. K. (1994): *For whom is a picture worth a thousand words? Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning*. In: *Journal of Educational Psychology*, H. 86, S. 389-401.
- Mayring, Philipp (2000): *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 7 Aufl. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- Mayring, Philipp (2002): *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. 5. Aufl. Weinheim: Beltz.
- McClurg, P. A.; Chaille', C. (1987): *Computer games: environments for developing spatial cognition*. In: *Journal of Educational Computing Research*, H. 3, S. 95-111.

- McNeil, B. J.; Nelson, K. R. (1991): *Meta-analysis of interactive video instruction: A 10-year review of achievement effects*. In: *Journal of Computer-Based Instruction*, Jg. 18, H. 1, S. 1-6.
- Meder, N. (2006): *Web-Didaktik. Eine neue Didaktik webbasierten, vernetzten Lernens*. Bielefeld: Bertelsmann.
- Mevarech, Z.; Shir, N.; Movshovitz-Hadar, N. (1992): *Is more always better? The separate and combined effects of a computer and video programme on mathematics learning*. In: *British Journal of Educational Psychology*, H. 62, S. 106-116.
- Michael, W. B.; Guilford, J. P.; Fruchter, B.; Zimmerman, W. S. (1957): *The description of spatial-visualization abilities*. In: *Educational and Psychological Measurement*, H. 17, S. 185-199.
- Miller, G. A. (1956): *The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information*. In: *Psychological Review*, H. 63, S. 81-97.
- Moore, M. G.; Kearsley, G. (1996): *Distance education: A systems view*. Belmont, Ca: Wadsworth Publishing Company.
- Morrison, J. B.; Tversky, B.; Bétrancourt M. (2000): *Animation: Does it facilitate learning?* Stanford, CA, USA. Proceedings of the AAAI 2000 Spring Symposium « Smart Graphics », S. 53-60.
- Mousavi, S., Low, R., Sweller, J. (1995): *Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes*. *Journal of Educational Psychology* **87** (2), S. 319–334.
- Müller, G. N.; Röhr, M.; Wittmann, E.C. (1997): *Schauen und Bauen – Geometrische Spiele mit Quadern*. Leipzig: Klett.
- Neisser, U. (1967): *Cognitive psychology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Niculescu, H. (1995): *Entwicklung und Effektivität von CBT im Rahmen der betrieblichen Weiterbildung*. Zürich, Univ., Diss., 1994. Frankfurt am Main: Lang.
- Niegemann, H. M. (2008): *Kompendium multimediales Lernen*. Berlin: Springer.

- Niemiec, R.; Sikorski, M.; Walberg, H. (1989): *Comparing the cost- effectiveness of tutoring and computer-based instruction*. In: *Journal of Educational Computing Research*, Jg. 5, H. 4, S. 395-407.
- Oakhill, J.; Garnham, A. (1996): *Mental Models in Cognitive Science: Essays in honour of Phil Johnson-Laird*. Hove, East Sussex: Psychology Press.
- Oevermann, U. (2000): *Die Methode der Fallrekonstruktion in der Grundlagenforschung sowie der klinischen und pädagogischen Praxis*. In: Kraimer, Klaus (Hg.): *Die Fallrekonstruktion. Sinnverstehen in der sozialwissenschaftlichen Forschung*. Orig.-Ausg., 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, S. 58-156.
- Paas, F.; Renkl, A.; Sweller, J. (2003): *Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments*. In: *Educational Psychologist*, Jg. 38, H. 1, S. 1-4.
- Padberg, F. (2005): *Didaktik der Arithmetik für Lehrerbildung und Lehrerfortbildung*. 3., erw., völlig überarb. Aufl. Heidelberg: Elsevier Spektrum Akad. Verl.
- Paivio, A. (1971): *Imagery and verbal processes*. New York: Holt Rinehart and Winston.
- Park, O. C.; Hopkins, R. (1993): *Instructional conditions for using dynamic visual displays: a review*. In: *Instructional Science*, Jg. 21, H. 6, S. 427-449.
- Phillips, B. S. (1970): *Empirische Sozialforschung : Strategie und Taktik*. Wien. New York.: Springer.
- Piaget, J. (1966): *Psychologie der Intelligenz*. 2. Aufl. Zürich: Rascher.
- Piaget, J. (1975): *Der Aufbau der Wirklichkeit beim Kinde*. 2. Aufl. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Piaget, J.; Inhelder, B. (1975): *Gesammelte Werke, Bd.6: Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde*. 3. Aufl. 1999. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Plötzner, R.; Bodemer, D.; Neudert, S. (2008): *Successful and unsuccessful use of dynamic visualisations in instructional texts*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation. Research implications for design*. New York: Cambridge Univ. Press, S. 71-91.

- Popp, M. (2007): *Web 0.0 im Klassenzimmer*. Herausgegeben von Spiegel Online. Online verfügbar unter <http://www.spiegel.de/schulspiegel/wissen/0,1518,483245,00.html>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2007, zuletzt geprüft am 12.07.2010.
- Pylyshyn, Z. W. (1973): *What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery*. In: *Psychological bulletin*, Jg. 80, H. 1, S. 1-24.
- Pylyshyn, Z. W. (1981): *The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge*. In: *Psychological Review*, Jg. 88, H. 1, S. 16-45.
- Quaiser-Pohl, C.; Lehmann, W.; Jordan, K.; Schirra, J. R. J. (2001): *Zum Einfluss des Computers auf die Raumvorstellung - eine differenzielle Analyse bei Studierenden von Computerwissenschaften*. In: *6. Arbeitstagung der Fachgruppe für Differentielle Psychologie, Persönlichkeitspsychologie und Psychologische Diagnostik der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Leipzig: Leipziger Univ.-Verl, S. 111-112.
- Quaiser-Pohl, C. & Jordan, K. (Hrg.) (2004): *Warum Frauen glauben, sie könnten nicht einparken – und Männer ihnen Recht geben*. München: Beck.
- Radatz, H.; Schipper, W.; Dröge, R.; Ebeling, A. (1999): *Handbuch für den Mathematikunterricht 3. Schuljahr*. Hannover: Schroedel.
- Rausch, A. (1984): *Galperin und Piaget - eine Analyse und ein Vergleich*. München: Angerer Verlag.
- Rebetez, C.; Sangin, M.; Betrancourt, M.; Dillenbourg, P. (2004): *Effects of collaboration in the context of learning from animations*. In: *Proceedings of EARLI SIG meeting on Comprehension of Text and Graphics: Basic and applied issues*. Veranstaltung vom 9-11 September 2004. Valencia, Spain. S. 187–192.
- Reeves, T. C. (1993): *Pseudoscience in computer-based instruction: The case of learner control research*. In: *Journal of Computer-Based Instruction*, Jg. 20, H. 2, S. 39-46.
- Reimann, P. (1997): *Lernprozesse beim Wissenserwerb aus Beispielen. Analyse, Modellierung, Förderung*. 1. Aufl. Bern: Huber.

- Reiss, K.; Albrecht, A. (1994): *Unterscheiden sich Mädchen und Jungen beim Geometrielernen mit und ohne Computerunterstützung?* In: *Mathematica didactica*, Jg. 17, H. 1, S. 90-105.
- Renkl, A. (2002): *Learning from worked-out examples: Instructional explanations supplement self-explanations*. In: *Learning & Instruction*, H. 12, S. 529-556.
- Renkl, A. (2005): *The worked-out-example principle in multimedia learning*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 229-246.
- Reusser, K. (1998): *Denkstrukturen und Wissenserwerb in der Ontogenese*. In: Klix, F.; Birbaumer, N.; Graumann, C. F. (Hg.): *Enzyklopädie der Psychologie*. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Serie II: Kognition. Band G: Wissenspsychologie. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie, S. 115-166.
- Rieber, L. P. (1991): *Animation, incidental learning, and continuing motivation*. In: *Journal of Educational Psychology*, H. 83, S. 318-328.
- Rogers, C. R. (1945): *The Non-Directive Method as a Technique for Social Research*. In: *American Journal of Sociology*, Jg. 50, H. 4, S. 279-283.
- Rost, D. H. (1977): *Raumvorstellung. Psycholog. u. pädagog. Aspekte*. Weinheim, Basel: Beltz.
- Roth, J. (2005): *Bewegliches Denken im Mathematikunterricht. Würzburg, Diss., 2005*. Hildesheim: Franzbecker.
- Rubitzko, T. (2006): *Aktives Lernen mit multiplen Repräsentationen - Zur Vermittlung komplexer physikalischer Inhalte mit Texten, Bildern, Animationen und Simulationen. Ludwigsburg, Pädg. Hochsch., Diss.*
- Russell, T. L. (1999): *The no significant difference phenomenon*. North Carolina State University.
- Salomon, G. (1994): *Interaction of Media, Cognition, and Learning*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

- Scherer, P. (2006): *Rechendreiecke - Vertiefende Übungen zum Einmaleins*. In: *Grundschule*, H. 1, S. 40-43.
- Schiefele, U.; Schaffner, E. (2006): *Wissenserwerb und Motivation*. In: Rost, D. H. (Hg.): *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Beltz, S. 866-872.
- Schnotz, W. (1994a): *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten. Univ., Habil.-Schr.--Tübingen, 1993*. Weinheim: Beltz Psychologie-Verl.-Union.
- Schnotz, W. (1994b): *Wissenserwerb mit logischen Bildern*. In: Weidenmann, B. (Hg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen*. 1. Aufl. Bern: Huber .
- Schnotz, W. (2001): *Wissenserwerb mit Multimedia*. In: *Unterrichtswissenschaft*, H. 4, S. 293-318.
- Schnotz, W. (2002): *Wissenserwerb mit Texten, Bildern und Diagrammen*. In: Issing, L. J.; Klimsa, P. (Hg.): *Information und Lernen mit Multimedia und Internet*. Lehrbuch für Studium und Praxis. 3., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Beltz PVU, S. 65-82.
- Schnotz, W. (2005): *An Integrated Model of Text and Picture Comprehension*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 49-69.
- Schnotz, W. (2006a): *Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Beltz.
- Schnotz, W. (2006b): *Was geschieht im Kopf des Lesers? Mentale Konstruktionsprozesse beim Textverstehen aus der Sicht der Psychologie und der kognitiven Linguistik*. In: Blühdorn, Hardarik (Hg.): *Text - Verstehen*. Grammatik und darüber hinaus. Berlin: de Gruyter, S. 222-238.
- Schnotz, W. (2008): *Why multimedia learning is not always helpful*. In: Rouet, J. F.; Lowe, R.; Schnotz, W. (Hg.): *Understanding multimedia documents*. New York: Springer, S. 17-41.

- Schnotz, W.; Bannert, M. (1999a): *Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Bild- und Textverstehen*. In: *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*, H. 46, S. 216-235.
- Schnotz, W.; Bannert, M. (1999b): *Strukturaufbau und Strukturinterferenz bei der multimedial angeleiteten Konstruktion mentaler Modelle*. In: Wachsmuth, I.; Jung, B. (Hg.): *KogWis99. Proceedings der 4. Fachtagung der Gesellschaft für Kognitionswissenschaft*, Bielefeld, 28. September – 1. Oktober 1999. Sankt Augustin: Infix, S. 79-85.
- Schnotz, W.; Böckheler, J.; Grzondziel, H. (1999): *Individual and co-operative learning with interactive animated pictures*. In: *European Journal of Psychology of Education*, H. 14, S. 245-265.
- Schnotz, W.; Lowe, R. (2008): *A unified view of learning from animated and static graphics*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation. Research implications for design*. New York: Cambridge Univ. Press, S. 304-356.
- Schnotz, W., Rasch, T. (2005): *Enabling, Facilitating, and Inhibiting Effects of Animations in Multimedia Learning: Why Reduction of Cognitive Load Can Have Negative Results on Learning*. *Educational Technology: Research and Development*, 53(3), S. 47-58.
- Schnotz, W.; Rasch, T. (2008): *Functions of animation in comprehension and learning*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation. Research implications for design*. New York: Cambridge Univ. Press, S. 92-113.
- Schnotz, W.; Seufert, T.; Bannert, M. (2001): *Lernen mit Multimedia: Pädagogische Verheißungen aus kognitionspsychologischer Sicht*. In: Silbereisen, R. K. (Hg.): *Bericht über den 42. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Lenkerich: Pabst Science Publishers, S. 457-467.
- Schumann, H. (2004): *Modellieren in dynamischen Geometriesystemen als Rekonstruktion*. In: *Beiträge zum Mathematikunterricht*. Hildesheim: Franzbecker, S. 537-540.

- Schwan, S. (2007): *Lernen mit Filmen*. In: Mandl, H.; Zumbach, J. (Hg.): *Pädagogische Psychologie in Theorie und Praxis. Ein fallbasiertes Lehrbuch*. Göttingen: Hogrefe, S. 99-104.
- Selter, C. (1997): *Entdecken und Üben mit Rechendreiecken. Eine substantielle Übungsform für den Mathematikunterricht*. In: *Friedrich Jahresheft: Lernmethoden, Lehrmethoden. Wege zur Selbständigkeit*. Seelze: Friedrich Verlag, S. 88-90.
- Shepard, R. N. (1982): *Mental images and their transformations*. Cambridge: MIT Press.
- Solso, R. L.; Reiss, M. (2005): *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Springer.
- Solso, R. L.; MacLin, M. K.; MacLin, O. H. (2004): *Cognitive psychology*. 7. ed. Boston, Mass.: Pearson/Allyn and Bacon.
- Souvignier, E. (2000): *Förderung räumlicher Fähigkeiten. Trainingsstudien mit lernbeeinträchtigten Schülern*. Frankfurt (Main), Univ., Diss., 2000. Münster: Waxmann.
- Spearman, C. (1927): *The abilities of man, their nature and measurement*. New York: Macmillan.
- Strübing, J. (2004): *Grounded theory. Zur sozialtheoretischen und epistemologischen Fundierung des Verfahrens der empirisch begründeten Theoriebildung*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss.
- Subrahmanyam, K.; Greenfield, P. M. (1994): *Effect of video game practice on spatial skills in girls and boys*. In: *Journal of Applied Developmental Psychology*, H. 15, S. 13-32.
- Sweller, J. (1999): *Instructional design in technical areas*. Melbourne: ACER Press.
- Sweller, J. (2002): *Visualisation and instructional design*. In: Plötzner, R. (Hg.): *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning*. Tübingen.

- Sweller, J. (2005a): *Implications of cognitive load theory for multimedia learning*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 19-30.
- Sweller, J. (2005b): *The redundancy principle in multimedia learning*. In: Mayer, R. E. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. New York: Cambridge University Press, S. 159-167.
- Sweller, J.; Chandler, P. (1994): *Why some material is difficult to learn*. In: *Cognition and Instruction*, H. 12, S. 185-233.
- Sweller, J.; van Merriënboer, J. J. G.; Paas, F. G. W. C. (1998): *Cognitive architecture and instructional design*. In: *Educational Psychology Review*, H. 10, S. 251-296.
- Thurstone, L. L. (1938): *Primary mental abilities*. Chicago: University of Chicago Press.
- Thurstone, L. L. (1949): *Mechanical aptitude III: Analysis of group tests*. In: *Psychometric Laboratory Research Report No 55*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Thurstone, L. L. (1950): *Some primary abilities in visual thinking*. In: *Psychometric Laboratory Research Report No. 59*. Chicago, IL: University of Chicago Press .
- Treumann, K.; Roeder, P. M. (1974): *Leistungsdimensionen im Mathematikunterricht*. 1. Aufl. Stuttgart: Klett.
- Tversky, B.; Heiser, J.; Lozano, S.; MacKenzie, R.; Morrison, J. (2008): *Enriching animations*. In: Lowe, R. K.; Schnotz, W. (Hg.): *Learning with animation*. Research implications for design. New York: Cambridge Univ. Press.
- Vernon, P. E. (1971): *The Structure of Human Abilities*. London: Methuen.
- vom Hofe, R. (1995): *Grundvorstellungen mathematischer Inhalte*. Kassel, Univ., Diss., 1994. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- vom Hofe, R. (2003): *Grundvorstellungen und Grundbildung*. In: *mathematik lehren*, H. 118, S. 4-8.

- Walther, G.; Granzer, D.; Köller, O. (2008): *Bildungsstandards für die Grundschule Mathematik konkret. Mit CD-ROM [Aufgabenbeispiele, Unterrichtsanregungen, Fortbildungsideen]*. 2. Aufl. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Weber, C. (1998): *Mathematische Vorstellungsübungen*. In: *mathematik lehren*, H. 86, S. 42-45.
- Weber, C. (2007): *Mathematische Vorstellungen bilden. Praxis und Theorie von Vorstellungsübungen im Mathematikunterricht der Sekundarstufe II*. Zürich, Univ., Diss., 2006. 1. Aufl. Bern: hep Verl.
- Weidenmann, B. (1995): *Ist der Begriff „Multimedia“ für die Medienpsychologie ungeeignet?* In: *Medienpsychologie*, H. 7, S. 256-261.
- Weidenmann, B. (2008): *Bilder in Lernprozessen: mehr wert als tausend Worte?* In: Mandl, H.; Zumbach, J. (Hg.): *Pädagogische Psychologie in Theorie und Praxis. Ein fallbasiertes Lehrbuch*. Göttingen: Hogrefe, S. 149-155.
- Weinert, F. E. (1996): *Lerntheorien und Instruktionsmodelle*. In: Weinert, Franz Emanuel (Hg.): *Psychologie des Lernens und der Instruktion*. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie, S. 1-48.
- Wettler, M. (2004): *Durch reden denken lernen*. In: Krauthausen, G.; Scherer, P. (Hg.): *Mit Kindern auf dem Weg zur Mathematik*. Festschrift für Hartmut Spiegel. Donauwörth: Auer Verlag, S. 171-178.
- Wetzel, C. D.; Radtke, P. H.; Stern, H. W. (1993): *Review of the effectiveness of video media in instruction*: (Navy Personnell Research and Development Center, NPRDC-TR-93-4). Office of Naval Research.
- Winter, H. (1984): *Begriff und Bedeutung des Übens im Mathematikunterricht*. In: *mathematik lehren*, H. 2, S. 4-16.
- Witte, K.-H. (1995): *Nutzeffekte des Einsatzes und Kosten der Entwicklung von Teachware. Empirische Untersuchung und Übertragung der Ergebnisse auf den praktischen Entwicklungsprozeß*. Univ., Diss.--Göttingen, 1995. Bovenden: Unipress-Verl.

- Wittmann, E. C. (1974): *Grundfragen des Mathematikunterrichts*. 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Wittmann, E. C. (1976): *Grundfragen des Mathematikunterrichts*. 3. Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Wittmann, E. C. (1981): *Grundfragen des Mathematikunterrichts*. 6., neu bearb. Aufl. Braunschweig: Vieweg.
- Wittmann, E. C. (1985): *Objekte-Operationen-Wirkungen: das operative Prinzip in der Mathematikdidaktik*. In: *mathematik lehren*, H. 11, S. 7-11.
- Wygotski, L. S. (1969): *Denken und Sprechen*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Yan, S. (2002): *Über die Wirkung modalitätsspezifischer Hinweisreize im ikonischen Gedächtnis*. Göttingen, Univ., Diss., 2002. Georg-August-Universität Göttingen. Online verfügbar unter <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2002/yan/>, zuletzt aktualisiert am 05.02.2005.
- Yeo, S; Loss, R.; Zadnik, M.; Harrison, A.; Treagust, D. (2004): *What do students really learn from interactive multimedia? A physics case study*. In: *American Journal of Physics*, Jg. 72, H. 10, S. 1351-1358.
- Zimbardo, P. G.; Gerrig, R. J.; Graf, R. (2004): *Psychologie*. 16., aktualisierte Aufl. München: Pearson Studium.
- zur Oeveste, H. (1987): *Kognitive Entwicklung im Vor- und Grundschulalter. Eine Revision der Theorie Piagets*. Univ., Habil.-Schr., [1987]--Hamburg, 1987. Göttingen: Verlag für Psychologie Hogrefe.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: AWARE-Strategie	6
Abbildung 2: Überblick über das Zusammenwirken der beteiligten Disziplinen	9
Abbildung 3: Die Faktoren des räumlichen Vorstellungsvermögens, ihre Eigenschaften und wesentlichen Zusammenhänge (nach Maier 1999)	12
Abbildung 4: Einbettung der Raumvorstellung in den Kontext von Vorstellungen. Darstellung nach Ilgner (1982)	13
Abbildung 5: Überblick über die Zusammenhänge entwicklungspsychologischer und allgemein-didaktischer Grundlagen des "Operativen Prinzips" in der Mathematikdidaktik	21
Abbildung 6: Integrierte Darstellung von Piagets Theorien zur Entwicklung des räumlichen Denkens und der Vier-Stadientheorie der Intelligenzentwicklung	25
Abbildung 7: Die „Duale Codierungstheorie“ nach Paivio (1971)	35
Abbildung 8: „Three Processing Demands on Cognitive Capacity“ (Mayer 2008, S. 36), ergänzt mit Bezügen zur Cognitive Load Theory	71
Abbildung 9: "Ten Ways to Overcome Challenges to Learning with Animation" (Mayer 2008, S. 37)	71
Abbildung 10: Überblick über die Unterrichtseinheit	80
Abbildung 11: Programm "Matheland": Netze als "Verpackungen in der Lagerhalle"	81
Abbildung 12: Internet-Plattform "Mathematikus": Modul Raumvorstellung "Würfelnetze"	81
Abbildung 13: Räumliche Lage des Zielobjektes auf eine Kante geneigt.	85
Abbildung 14: "Falsches" Netz nach Betätigen des "OK-Buttons".	86
Abbildung 15: Überblick über die verschiedenen Dispositionen des Nutzers	90
Abbildung 16: Vorgehen bei Analyse und Interpretation	94
Abbildung 17: Gebildete Kategorien nach Analyse und Interpretation	95
Abbildung 18: Zuordnungen bei den "Vierer-Würfelnetzen" (mit vier Quadraten in einer Linie).	99
Abbildung 19: Zuordnungen bei den "Dreier- Würfelnetzen und dem Zweier-Würfelnetz".	99
Abbildung 20: Netze, die mit der Vorgehensweise "Mentales Modellieren" bearbeitet wurden.	100
Abbildung 21: "Hybrid-, Binnen- und Außenperspektive"	109
Abbildung 22: Lernszenarien A und B im Zusammenhang mit den Medien "Computer" und "Material"	145
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Phasen im Lernprozess und Aspekten der Passung	152
Abbildung 24: Zusammenhänge des Handelns, Bewegens und der Handlungswerkzeuge	159
Abbildung 25: Überblick über die Zusammenhänge kognitiver Anforderungen	162
Abbildung 26: "Hybrid-, Binnen- und Außenperspektive"	167
Abbildung 27: Zusammenhänge der Komponenten des "Operativen Prinzips"	178

8 Anhang

8.1 Interviewleitfaden

Interviewleitfaden "Wirkung einer multimedialen Lernumgebung auf das Mathematiklernen" – Räumliches Vorstellungsvermögen am Beispiel von (Würfel-) Netzen

In dem Interview werde ich dir einige allgemeine Fragen stellen, einige zu letzter Woche und du sollst auch einige Aufgaben bearbeiten.

Vorerfahrungen Computernutzung:

1. Nenne mir doch noch einmal deinen Namen. – Wann bist du geboren? In welchem Jahr?
2. Hast du zu Hause einen eigenen Computer? Deine Eltern? Seit wann? Wozu benutzt du den Computer? – Machst du zu Hause auch Mathe am Computer?
3. Hast du in der Schule mit dem Computer gearbeitet? Was? Software? Spiele – Im Matheunterricht?
4. Arbeitest du mit dem Computer eher allein oder mit anderen zusammen?

Einstellungen zur Schule/ zum Fach:

5. Jetzt möchte ich von dir erst einmal wissen, wie gut du etwas findest oder wie gerne du etwas tust: Und dazu sollst du Noten von 1 bis 6 verteilen. Eins heißt sehr gut oder sehr gern und sechs heißt sehr schlecht oder du magst es gar nicht gerne. O.K.?
 1. Wie findest du die Schule?
 2. Wie findest du das Fach Mathe?
 3. Habt ihr im Matheunterricht auch Geometrie gemacht? – Viel oder eher wenig? – Welche Note gibst du der Geometrie?
6. Hast du in der Schule auch Aufgaben/ Unterricht gemacht, in dem du dir etwas im Kopf vorstellen musstest, so wie wir das in der letzten Woche gemacht haben? Habt ihr das oft gemacht? Fällt dir das eher leicht oder schwer? Hilft es dir, wenn du dir etwas im Kopf vorstellst?

Aufgabenbearbeitungen zu (Würfel-) Netzen – Anschließend Reflektieren über Nutzung, Wirksamkeit, Denkprozesse und Strategien:

7. Aufgabe 1a) Überlege dir zwei Würfelnetze und zeichne sie auf.

Aufgabe 1b) Ich gebe dir gleich Aufgaben – einmal bekommst du zwei vorgegebene Netze:

- mit Material
- auf dem Blatt Reihenfolge permutieren
- und am Computer

und du sollst mir jeweils sagen: Ist das ein Würfelnetz oder ist das keins.

Jeweilige Aufgabenstellung dazu:

1. Teil: **Würfelnetz, ja oder nein?** – Wie hast du das herausgefunden, wie bist du vorgegangen, was hast du überlegt? Was zuerst, beschreibe genau.

2. Teil: **Wenn hier die Grundfläche ist, wo ist dann die Deckfläche?**

Bei der jeweiligen Bearbeitung Vorgehen erklären lassen. Danach jeweils zusammenfassend: Erkläre mir bitte genau, wie du vorgehst – also was du tust, dir überlegst, dir vorstellst – um die Aufgabe zu lösen.

Evtl. folgende Fragen einbringen, um den Redefluss zu fördern: Wie stellst du dir das in deinen Gedanken vor? – Klappst du alle Flächen gleichzeitig oder nacheinander? Klappst du langsam oder eher schnell oder klappst du gar nicht richtig, sondern du hast z.B. den Zustand, bei dem die Fläche liegt und im nächsten Moment/Zustand steht sie schon da oder du weißt es auswendig?

8. / bzw. 16. Entweder hier: ‚Cartoons‘ - Bilderfolgen einzelner Faltzustände (je 3er Sets und ein ‚falsches‘ Bild) bearbeiten lassen. Aufgabenstellung: Ordne jeweils vom Netz zum Würfel. Wie bist du dabei vorgegangen?

9. Gibt es für dich Unterschiede zwischen einem ausgeschnittenen Netz, einem Netz auf dem Computerbildschirm und einem aufgezeichneten Netz auf Papier?

10. Was hat dir bei deinen Bearbeitungen eben am meisten geholfen? Die Netze aus Material, die auf Papier, die auf dem Computer oder deine Gedanken? Wenn keine Auskunft zum Computer, dann: Hat dir der Computer dabei geholfen? Wenn ja und keine Erklärung, dann: Wie? Wenn nein, dann: Warum nicht?

Was war für dich am schwierigsten? – Die Aufgaben mit dem Material, auf dem Blatt oder auf dem Computer?

Evtl. noch folgende Ergänzungsfragen: In der letzten Woche hast du viele Aufgaben, bei denen du dir etwas im Kopf vorstellen musstest, mit Material/ mit dem Computer / auf Papier bearbeitet. Was hat Dir dabei am meisten geholfen? – Das Material/ der Computer, die Bilder auf Papier oder deine eigenen Gedanken?

11. Hast du in der letzten Woche durch die Arbeit mit dem Material/ mit dem Computer / mit den Aufgabenstellungen auf Papier etwas Neues herausgefunden, entdeckt, etwas Neues gemacht? Was? Wie?

12. Hat der Computer Vorteile gegenüber

- dem Material? Nachteile?
- den Aufgaben auf Papier? Nachteile?
- deinen Vorstellungen von (Würfel-) Netzaufgaben in deinem Kopf, (also wenn du dir die Aufgaben in deinem Kopf vorstellst)? Nachteile?

Was machst du dann überhaupt noch? Musst du dann überhaupt noch eine Aufgabe lösen oder macht das der Computer? Frage im Hinblick auf die Medien permutieren.

13. Was hast du davon, wenn du am Computerbildschirm siehst, wie sich das (Würfel-) Netz verändert und langsam zusammenfaltet? Hast du da überhaupt etwas davon? Evtl.: Was beobachtest du dann genau?

14. Glaubst du, dass deine Vorstellungskraft, dass du dir Bewegungen von (Würfel-) Netzen im Kopf vorstellen kannst, durch die Arbeit mit (Würfel-) Netzen auf dem Computerbildschirm besser wird, gleich bleibt oder vielleicht sogar schlechter wird? Wieso – Warum? (Bei Missverstehen konkretes Szenario aufzeigen)

15. Würdest du bei (Würfel-) Netzaufgaben, bei denen du dir etwas im Kopf vorstellen musst, in Zukunft mit dem Computer arbeiten oder reicht es dir, wenn du (mit Material arbeitest und) die Aufgaben auf Papier aufgezeichnet hast und du es dir im Kopf vorstellst? – Oder Material?

16. / bzw. 8. Oder hier: Zusatz (je nach Zeit): Cartoons – (3er Sets, wovon einmal mit einer zusätzlichen falschen Abbildung). Aufgabenstellung: Ordne jeweils vom Netz zum Würfel.

8.2 Kriterien zur Konstruktion der Tests

Bei den informellen Vor- und Nachtests mussten die Lernenden allein mittels der Vorstellung ...

- ... entscheiden und begründen, ob und warum sich ein vorgegebenes Netz zu einem Würfel zusammenfalten lässt.
- ... zu vorgegebenen Flächen eines Würfelnetzes weitere gesuchte Flächen auffinden und benennen.
- ... entscheiden und begründen, welche Quadratflächen-Kanten beim Zusammenfalten aufeinander stoßen.

Zusätzliches Kriterium für den Nachtest:

Im Nachtest mussten mehrere und schwierigere Aufgaben in gleicher Zeiteinheit bearbeitet werden.

Differenzierung des Schwierigkeitsgrades der Aufgaben über die Anzahl möglicher Behaltensprozesse beim mentalen Zusammenfalten des Netzes.

Meine Begründungen:

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Aufgabe 2)**Name:** _____

Wo ist die **Deckfläche**? – Die Fläche, auf der der Würfel steht, heißt **GRUNDFLÄCHE** (G). Suche in jedem Würfelnetz die **DECKFLÄCHE** (D).

1)	Bei- spiel				2)		G			3)							
G		D															
4)					5)	G			6)				7)				
G														G			
8)					9)				10)				11)				
						G											
		G												G			
12)					13)				14)		G		15)	G			
		G															

Wie hast du die Deckfläche gefunden?

Aufgabe 3)**Name:** _____

Falte die Würfelnetze zusammen. Zeigen dann die Pfeilspitzen zueinander? – Ja oder Nein?

1)	2)	3)	
4)	5)	6)	7)
8)	9)	10)	11)
12)	13)	14)	15)

Wo ist der passende Pfeil? – Zeichne in jedes Würfelnetz den fehlenden Pfeil ein.

1)	2)	3)	
4)	5)	6)	

* Auf den markierten Quadratflächen waren in den ausgedruckten Tests Pfeile eingezeichnet.

Meine Begründungen:

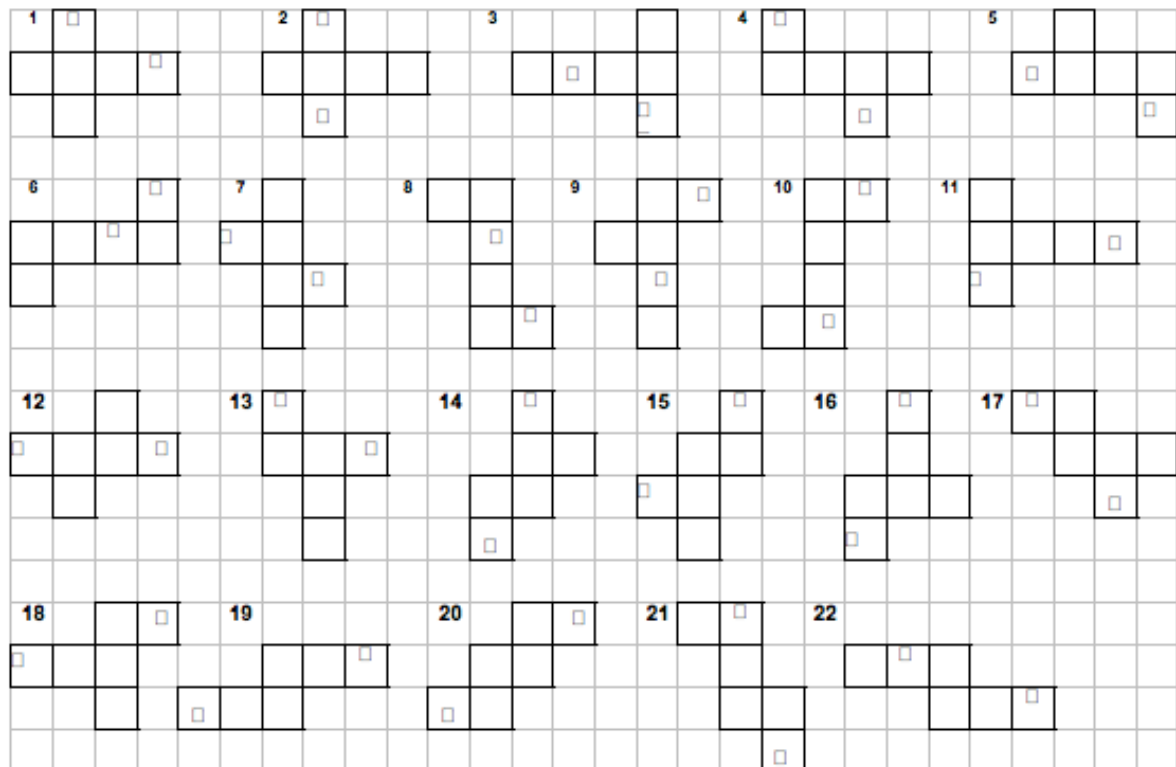
This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Wie hast du die Deckfläche gefunden?

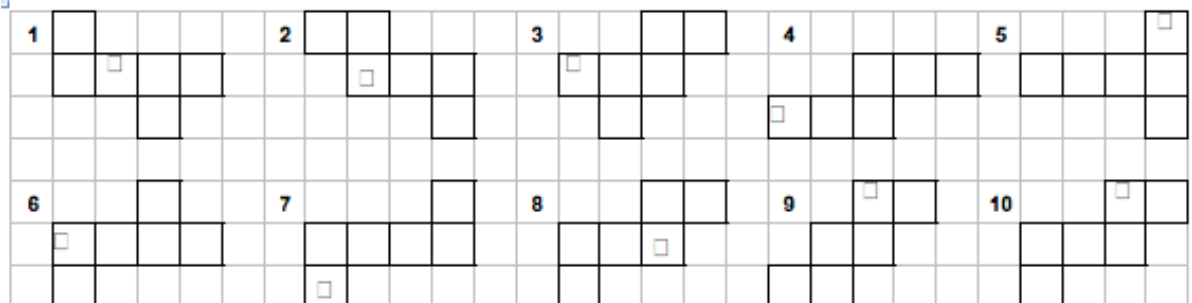
This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Aufgabe 3)**Name:** _____

Falte die Würfelnetze zusammen. Zeigen **dann** die Pfeilspitzen zueinander? – Ja oder Nein?



Wo ist der passende Pfeil? – Zeichne in jedes Würfelnetz den fehlenden Pfeil ein.



Wie hast du die passenden Pfeile gefunden?

* Auf den markierten Quadratflächen waren in den ausgedruckten Tests Pfeile eingezeichnet.