

Sequenz- und Sequenzierungseffekte
bei der Bearbeitung
voraussetzungsreicher Aufgaben

Dissertation

der Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von

Dipl.-Psych. Katharina Scheiter

aus Göttingen

Tübingen

2003

Tag der mündlichen Qualifikation: 23. Juli 2003

Dekan: Prof. Dr. Ulrich Gützer

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Friedrich W. Hesse

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Werner H. Tack (Universität Saarbrücken)

3. Berichterstatter: Prof. Dr. Rolf Plötzner (PH Freiburg)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Menschen danken, die wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen und mich bei ihrer Anfertigung unterstützt haben.

Zunächst möchte ich mich bei meinen Doktorvätern Herrn Prof. Friedrich W. Hesse sowie Herrn Prof. Werner H. Tack dafür bedanken, dass sie mir die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht und mir dabei den gewünschten Freiraum gewährt haben. Mein Wechsel von der Universität des Saarlandes an die Eberhard-Karls-Universität Tübingen während meiner Promotionszeit verschafft mir das Privileg, an dieser Stelle zwei Doktorväter zu nennen, von deren beider Forschungsinteressen viel in diese Arbeit eingeflossen ist.

Mein ganz besonders herzlicher Dank gilt PD Dr. Peter Gerjets: Wir arbeiten seit inzwischen 6 Jahren zusammen, und Du hast meinen wissenschaftlichen Werdegang in wesentlicher Weise geprägt und unterstützt. Deine kritische Haltung hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank für die sehr hilfreichen Diskussionen und unzähligen Anregungen, für die Du Dir immer Zeit genommen hast. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch Deiner Frau Marianne Maxwitat-Gerjets, die gerade in den letzten Wochen der Anfertigung dieser Arbeit wahrscheinlich nur sehr wenig freie Zeit mit Dir gemeinsam verbringen konnte.

Des Weiteren möchte ich Tina Schorr, Julia Schuh, Astrid Selke und Carmen Zahn für motivationale Unterstützung und praktische Hilfeleistungen vor allem in der Phase der Fertigstellung der Arbeit danken. Ebenso möchte ich an dieser Stelle Flora Brehm, David Bruns, Carina Krämer, Frauke Lancker, Lisa Olbrich, Sven Unkelbach, Markus Werkle sowie Julia Zimball erwähnen, die mich vor allem bei der Datenerhebung unterstützt haben. Simon Albers hat durch die Anpassung der Skripte zur Steuerung der computergestützten Datenerfassung meine Arbeit sehr erleichtert.

Schließlich danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre finanzielle Unterstützung. Meine Arbeit ist zu wesentlichen Teilen während meiner Zeit als Stipendiatin im Graduiertenkolleg Kognitionswissenschaft: „Empirie, Modellbildung und Implementation“ sowie als Mitarbeiterin des Projekts *Knowledge Acquisition and Knowledge Utilization* im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 378: „Ressourcenadaptive kognitive Prozesse“ an der Universität des Saarlandes entstanden.

Schließlich danke ich sehr herzlich meinen Eltern, die – scheinbar ohne zu zweifeln – darauf vertrauen, dass aus ihrem Kind schon „etwas werden“ wird.

Inhaltsverzeichnis

0.	Einleitung	13
1.	Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben	23
1.1	Bearbeitung elementarer Reiz-Reaktions-Aufgaben im Rahmen des Taskshift-Paradigmas	27
1.2	Bearbeitung von Induktionsaufgaben	32
1.3	Bearbeitung von Transformationsaufgaben	37
1.4	Rahmenkonzeption: Sequenzeffekte als Folge von Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und von Wissenstransfer	48
2.	Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	53
2.1	Empirische Befunde zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	54
2.2	Lernen und Wissenstransfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	60
2.2.1	Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben als Folge schemabasierter oder analoger Problemlöseprozesse	63
2.2.2	Transfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	79
2.2.3	Zusammenfassung und Fazit	81
3.	Kognitionswissenschaftliche Analyse der Entstehung von Sequenzeffekten	85
3.1	Sequenzeffekte aus der Perspektive der kognitiven Architektur ACT	87
3.1.1	Lernen in ACT	91
3.1.2	Transfer in ACT	102
3.2	Bedingungen für einen (erfolgreichen) analogen Transfer	111
3.3	Ableitung von Forschungsfragen zu Sequenzeffekten bei voraussetzungsreichen Aufgaben	128

4.	Möglichkeiten der strategischen Nutzung von Sequenzeffekten durch Aufgabensequenzierung	139
4.1	Die Beziehung von Aufgabensequenzierung zu Metakognition, Planen und <i>scheduling</i>	140
4.2	Aufgabensequenzierung als vorwärts gerichteter <i>retrieval</i> -Prozess	144
4.2.1	Voraussetzungen für die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung	149
4.2.2	Kognitive Voraussetzungen für eine erfolgreiche Aufgabensequenzierung	151
4.3	Ableitung von Forschungsfragen zur Sequenzierung voraussetzungsreicher Aufgaben	152
5.	Sequenzeffekte und Aufgabensequenzierung - eine Fragebogenstudie	157
6.	Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung von Textaufgaben aus der Algebra	167
6.1	Experiment 1: Sequenzeffekte bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben in vorgegebenen Reihenfolgen	177
6.2	Experiment 2: Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben in frei wählbaren Reihenfolgen	191
6.3	Experiment 3: Moderation von Sequenz- und Sequenzierungseffekten durch die Fähigkeit zur Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten	203
6.4	Fazit zu Sequenzeffekten und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben	216
7.	Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung von Textaufgaben aus der Kombinatorik	223
7.1	Experiment 4: Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben in frei wählbaren Reihenfolgen	232
7.2	Experiment 5: Sequenzeffekte bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben in vorgegebenen Reihenfolgen	261
7.3	Experiment 6: Moderation von Sequenz- und Sequenzierungseffekten durch Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten	268
7.4	Fazit zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben	281

8.	Zusammenfassung und Ausblick	285
8.1	Überblick über die Entwicklung eines integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung	285
8.1.1	Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben	286
8.1.2	Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	288
8.1.3	Kognitionswissenschaftliche Reanalyse der Rahmenkonzeption mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT	291
8.1.4	Erweiterung der Reanalyse um Bedingungen erfolgreichen analogen Transfers	292
8.1.5	Zentrale Annahmen des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten als Gegenstand der eigenen Untersuchungen	294
8.2	Sequenzeffekte als Folge günstiger Lern- und/oder Transferbedingungen bei der Aufgabenbearbeitung - empirische Befunde	295
8.2.1	Förderung des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung	295
8.2.2	Förderung von Transferprozessen	300
8.2.3	Interaktion von Sequenzeffekten mit dem domänenspezifischen Vorwissen	304
8.2.4	Fazit und Ausblick	307
8.3	Sequenzierung multipler Aufgaben	311
8.3.1	Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung - Rolle des domänenspezifischen Vorwissens und der Qualität der Präsentationssequenz	313
8.3.2	Aufgabensequenzierung und Problemlöseperformanz	319
8.3.3	Fazit und Ausblick	323
8.4	Fazit zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben	325
9.	Literaturverzeichnis	329

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Testaufgaben nach Zollman (1987)	56
Tabelle 2:	Korrekte Antworten in Prozent in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität und der Aufgabensequenz	57
Tabelle 3:	Analogie am Beispiel zweier isomorpher Algebraaufgaben	67
Tabelle 4:	Analoges Problemlösen: <i>Mapping</i> und Inferenz	76
Tabelle 5:	Bedingungen für einen erfolgreichen analogen Transfer	112
Tabelle 6:	Nennungshäufigkeiten in Prozent (absolute Häufigkeiten in Klammern) für Strategien zur Selektion eines Quellproblems (Reed et al., 1990)	122
Tabelle 7:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 6	158
Tabelle 8:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 1	159
Tabelle 9:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 2	160
Tabelle 10:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 3	162
Tabelle 11:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 4	163
Tabelle 12:	Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 5	164
Tabelle 13:	Lernbeispiele für die drei Aufgabenkategorien mit den für die Lösung benötigten Grundformeln	169
Tabelle 14:	Ausgearbeitetes Lösungsbeispiel für Arbeitsaufgaben	170
Tabelle 15:	Konstruktionsmatrix für die neun isomorphen in den Experimenten 1 bis 3 verwendeten Testaufgaben	173
Tabelle 16:	Nach Strukturmerkmalen (SM) bzw. nach Oberflächenmerkmalen (OM) gebildete Aufgabenblöcke sowie aus den Aufgabenblöcken konstruierte Aufgabensequenzen für die neun isomorphen Testaufgaben	176

Tabelle 17:	Transferaufgaben	183
Tabelle 18:	Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz	197
Tabelle 19:	Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz	209
Tabelle 20:	Aufgabenkategorien in der Kombinatorik	226
Tabelle 21:	Einfache und komplexe Testaufgaben für die Aufgabenkategorien Permutation, Variation und Kombination (jeweils ohne Wiederholung)	231
Tabelle 22:	Fragebogenitems zur Erfassung des konzeptuellen Wissens vor und nach der Versuchsdurchführung	236
Tabelle 23:	Performanz (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens	247
Tabelle 24:	Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens	249
Tabelle 25:	Verweildauer in der Testphase, getrennt nach Lösungszeit und Auswahlzeit (in Sekunden) als Funktion des Sequenzierungsverhaltens	257
Tabelle 26:	Performanz (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens	266
Tabelle 27:	Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz (bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge)	275
Tabelle 28:	Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung (bei ungünstiger Präsentationssequenz)	277
Tabelle 29:	Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion des Sequenzierungsverhaltens (bei ungünstiger Präsentationssequenz)	279

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rahmenkonzeption zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben	49
Abbildung 2:	Schemabasiertes Problemlösen am Beispiel einer Algebraaufgabe	65
Abbildung 3:	Rahmenkonzeption zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer und voraussetzungsreicher Aufgaben	82
Abbildung 4:	Integratives und kognitionswissenschaftlich präzisiertes Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung	129
Abbildung 5:	Darstellung der Aktivierung von Wissensrepräsentationen nach der Transfer-Hypothese	179
Abbildung 6:	Problemlöseperformanz in % für verschiedene Aufgabentypen als Funktion der Bearbeitungssequenz	188
Abbildung 7:	Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Bearbeitungssequenz	189
Abbildung 8:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung isomorpher und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens	198
Abbildung 9:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung korrespondierender und nicht-korrespondierender Aufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens	199
Abbildung 10:	Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens	201
Abbildung 11:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung isomorpher und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Kategorisierungsleistung	210

Abbildung 12:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung korrespondierender und nicht-korrespondierender Aufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Qualität der Aufgabenkategorisierung	211
Abbildung 13:	Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Qualität der Aufgabenkategorisierung	213
Abbildung 14:	Ähnlichkeitsbeziehungen der drei Aufgabenkategorien Permutation, Variation und Kombination	230
Abbildung 15:	Lösungsformular zur Eingabe der Antworten für die Testaufgaben (Übungsseite)	238
Abbildung 16:	Ausgearbeitete Beispielaufgaben (Standardfall und Spezialfall)	240
Abbildung 17:	Mittlere aufsummierte Positionsdifferenzen für die Bearbeitung einfacher Testaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens für Sequenzierer	251
Abbildung 18:	Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung in % als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens	253
Abbildung 19:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens	254
Abbildung 20:	Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens	255
Abbildung 21:	Verweildauer in Sekunden in der Testphase als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens	256

0. Einleitung

Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildet die theoretische Analyse und empirische Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben. Sequenz- und Sequenzierungseffekte können sich dann ergeben, wenn multiple Aufgaben zu bearbeiten sind, die in einer bestimmten Reihenfolge präsentiert werden, von der aber gegebenenfalls bei der Aufgabenbearbeitung abgewichen werden kann. Sequenzeffekte resultieren, wenn die Performanz bei der Aufgabenbearbeitung in Abhängigkeit von der vorgegebenen Reihenfolge variiert, in der diese Aufgaben dargeboten werden. Von Sequenzierungseffekten wird dagegen in dieser Arbeit immer dann gesprochen, wenn sich die Problemlöseperformanz von Personen, die Aufgaben in einer vorgegebenen Präsentationssequenz bearbeiten, von der Performanz derjenigen Personen unterscheidet, die – abweichend von dieser Präsentationssequenz – eine andere Bearbeitungsreihenfolge wählen und damit eine Sequenzierung der Aufgaben vornehmen. Diese Phänomene können grundsätzlich sowohl für voraussetzungsarme als auch für voraussetzungsreiche Aufgaben untersucht werden, wobei sich voraussetzungsreiche Aufgaben dadurch auszeichnen, dass ihre Bearbeitung in hohem Ausmaß domänenspezifisches Vorwissen voraussetzt. Darüber hinaus weisen viele voraussetzungsreiche Aufgaben eine relativ umfangreiche semantische Einbettung der eigentlichen lösungsrelevanten Information auf, die trotz ihrer objektiv gegebenen Bedeutungslosigkeit für den Problemlöseprozess diesen nichtsdestotrotz beeinflussen kann. In der vorliegenden Arbeit wurden Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben untersucht, wobei die Unterschiede, die sie zu voraussetzungsarmen Aufgaben aufweisen, eine bedeutsame Rolle spielen.

Ein starkes Plädoyer für die Existenz von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben haben Newell, Shaw und Simon (1958) bereits in den Anfängen einer kognitionswissenschaftlich fundierten Problemlösepsychologie formuliert. Sie postulierten, dass eine wesentliche Ähnlichkeit zwischen dem *Logic Theorist* (LT) – einem Computerprogramm zum Auffinden logischer Beweise – und menschlichen Problemlösern darin bestehe, dass die Problemlösefertigkeit durch die Reihenfolge, in der die Probleme präsentiert werden, beeinflusst werde: „Its [LT's] ability to solve a particular problem depends on the sequence in which problems are

presented to it in much the same way that a human subject's behavior depends on this sequence“ (Newell et al., 1958, S. 162).

Entgegen dieses deutlichen Plädoyers für die Existenz von Sequenzeffekten beim Problemlösen wurde bislang nicht systematisch untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben überhaupt auftreten. Mit der vorliegenden Arbeit ist daher sowohl ein theoretischer als auch ein empirischer Anspruch verbunden.

Auf der theoretischen Seite ist es Ziel dieser Arbeit, ein integratives Rahmenmodell für die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung zu entwickeln, welches auf verschiedene Aufgabenarten angewendet werden kann und welches aber insbesondere auch geeignet ist um vorherzusagen, unter welchen Bedingungen mit Sequenzeffekten bei voraussetzungsreichen Aufgaben zu rechnen ist. Aufbauend auf diesem Rahmenmodell ist es auch möglich, Hypothesen darüber abzuleiten, inwieweit Problemlöser potenzielle Sequenzeffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben strategisch nutzen können, um ihre Performanz positiv zu beeinflussen. Diese strategische Nutzung von Sequenzeffekten kann z.B. darin bestehen, Aufgaben vor der eigentlichen Bearbeitung zunächst in eine günstige Bearbeitungsreihenfolge zu bringen, sofern die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung freigestellt ist. Dabei interessiert sowohl die Frage, unter welchen Bedingungen eine solche Aufgabensequenzierung vorgenommen wird als auch die Frage, wie die Problemlöseperformanz durch eine Aufgabensequenzierung beeinflusst wird.

Der empirische Anspruch der Arbeit besteht darin, das aufgestellte Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung sowie die darauf aufbauenden Annahmen zu Sequenzierungseffekten durch empirische Evidenz zu belegen. Zu diesem Zweck werden im zweiten Teil der Arbeit Ergebnisse einer Fragebogenstudie sowie die Befunde von sechs Experimenten berichtet und auf dem Hintergrund des Rahmenmodells und der bezüglich Sequenzierungseffekten getroffenen Annahmen diskutiert. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die Inhalte der einzelnen Kapitel gegeben.

In **Kapitel 1** werden zunächst Ergebnisse empirischer Untersuchungen zu Sequenzeffekten vorgestellt, die an so genannten voraussetzungsarmen Aufgaben durchgeführt wurden (*knowledge-lean problems* nach VanLehn, 1989). Diese Aufgaben sind dadurch charakterisiert, dass ihre Bearbeitung nur in geringem Ausmaß domänenspezifisches Wissen voraussetzt. Stattdessen sind diese Aufgaben auf der

Basis der in der Aufgabenstellung und in der Instruktion enthaltenen Informationen lösbar, und für ihre Bearbeitung müssen nur eine geringe Anzahl von Regeln eingesetzt werden. Als primäres Leistungsmaß werden häufig Bearbeitungszeiten erfasst, da sich hinsichtlich der Fehlerzahlen in den meisten Fällen kaum eine Variabilität abzeichnet. Die zur Untersuchung von Sequenzeffekten herangezogenen Klassen voraussetzungsarmer Aufgaben umfassen elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben, Aufgaben zur Regelinduktion sowie so genannte Transformationsaufgaben. Die innerhalb dieser drei Aufgabenklassen als leistungsförderlich identifizierten Bearbeitungssequenzen beinhalten eine Anordnung der Aufgaben einerseits entsprechend ihrer *strukturellen Ähnlichkeit* und andererseits entsprechend ihrer *relativen Komplexität*.

Für die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben werden innerhalb der drei Aufgabenklassen unterschiedliche Erklärungsansätze verwendet, die jedoch gewisse Gemeinsamkeiten aufweisen. Diese Gemeinsamkeiten erlauben es im Hinblick auf die Entwicklung eines Rahmenmodells, erste Annahmen bezüglich der für Sequenzeffekte verantwortlichen kognitiven Prozesse zu formulieren. Die erste Annahme besteht darin, dass an der Entstehung von Sequenzeffekten zwei Teilprozesse beteiligt sind, nämlich *Lernen bei der Aufgabenbearbeitung* und *Wissenstransfer*. Lernen bei der Aufgabenbearbeitung besteht in einer Veränderung des kognitiven Systems des Problemlösers, bei der während der Aufgabenbearbeitung neue Wissenseinheiten generiert bzw. bereits bestehende Wissenseinheiten modifiziert werden. Dieses Wissen steht im Anschluss zur Verfügung, um für die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben angewendet zu werden (Wissenstransfer). Die zweite Annahme besteht darin, dass Sequenzeffekte dann entstehen können, wenn sich Aufgabensequenzen in dem Ausmaß unterscheiden, in dem sie einen oder beide Prozesse unterstützen.

Für voraussetzungsarme Aufgaben lässt sich zeigen, dass der Lernprozess vor allem in einer zunehmenden Aktivierung bearbeitungsrelevanten Wissens besteht, und es wird davon ausgegangen, dass ein Transfer auf nachfolgende Aufgaben weitestgehend automatisch erfolgt. Während sich eine differenzielle Eignung von Aufgabensequenzen im Hinblick auf Lernen bei der Aufgabenbearbeitung vor allem dann ergibt, wenn die zu bearbeitenden Aufgaben nach ihrer Komplexität zunehmend angeordnet sind, eignen sich für einen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben insbesondere solche Sequenzen, in denen Aufgaben des gleichen Typs (d.h. strukturell identische Aufgaben) nacheinander bearbeitet werden.

In **Kapitel 2** wird die Frage erörtert, inwieweit Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben auf vergleichbaren Prozessen der Wissensaktivierung und des automatischen Transfers beruhen oder ob diese Aufgaben im Vergleich zu voraussetzungsarmen Aufgaben bestimmte Eigenschaften aufweisen, die erwarten lassen, dass auch andere Mechanismen eine Rolle spielen. Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben bilden den Untersuchungsgegenstand der eigenen empirischen Untersuchungen. Bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben (*knowledge-rich problems* nach VanLehn, 1989), die oftmals eine sehr umfangreiche semantische Einbettung aufweisen, müssen Problemlöser in hohem Ausmaß auf (zuvor vermitteltes) domänenspezifisches Wissen zurückgreifen.

Entscheidend für die in diesem Kapitel vorgenommene Analyse voraussetzungsreicher Aufgaben ist es, dass diese Aufgaben in Abhängigkeit von der Vorerfahrung, über die ein Problemlöser in einer Untersuchungsdomäne verfügt, mit unterschiedlichen Methoden bearbeitet werden können, die auf unterschiedlichen Wissensrepräsentationen beruhen und deren Anwendung auch unterschiedliche Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung zur Folge hat. Problemlöser können einerseits über Fallwissen verfügen, welches in konkreten Repräsentationen einzelner Problemlöseerfahrungen besteht, auf die zurückgegriffen werden kann, um eine neue Aufgabe *analog* zu dieser früheren Problemlöseepisode zu lösen. Verfügt ein Problemlöser andererseits bereits über hinreichende Expertise in einer Domäne, ermöglicht ihm dies, neue Aufgaben durch Heranziehung bereits vorhandener Aufgabenschemata – als abstrakte Repräsentationen von Wissen über Aufgabenkategorien und damit assoziierten Lösungsprozeduren – zu bearbeiten. Während analoges Problemlösen vor allem im Erwerb deklarativer, merkmalsbasierter – im Gegensatz zu prozeduralen, fertigkeitstbasierten – Wissensrepräsentationen resultiert (d.h. zusätzliches Fallwissen oder Schemata), kommt es beim Einsatz schemabasierter Problemlösemethoden dagegen vor allem zu einer Automatisierung der zur Aufgabenbearbeitung verwendeten Schemata (Sweller, van Merriënboer & Pass, 1998).

Nicht nur Lernen bei der Aufgabenbearbeitung gestaltet sich jedoch für voraussetzungsreiche Aufgaben anders als für voraussetzungsarme Aufgaben. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass ein Wissenstransfer auf nachfolgende Aufgaben für voraussetzungsreiche Aufgaben in den meisten Fällen nicht automatisch erfolgt, sondern voraussetzt, dass Problemlöser zunächst lösungsrelevante

strukturelle Aufgabenmerkmale erkennen. Lediglich bei Experten, die über hoch spezialisierte und automatisierte Aufgabenschemata verfügen, kann angenommen werden, dass der Abruf dieser Schemata aus dem Gedächtnis sowie deren Anwendung auf die Bearbeitung einer Aufgabe ohne bewusste Anstrengung erfolgt. Problemlöser mit geringer ausgeprägten Vorerfahrungen in einer Untersuchungsdomäne müssen sich hingegen deliberativ mit einer Aufgabe auseinandersetzen, um ihre strukturellen Merkmale zu identifizieren. Das Wissen über die Strukturmerkmale einer Aufgabe kann dann genutzt werden, um entweder ein geeignetes (d.h. durch diese Strukturmerkmale definiertes) Aufgabenschema oder aber ein Quellproblem aus dem Gedächtnis abzurufen, um die Aufgabe zu lösen. Die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Aufgabenmerkmale wird wesentlich durch die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens beim Problemlöser sowie durch die Ausprägungen der lösungsirrelevanten Oberflächenmerkmale der Aufgaben mit gesteuert, die bei voraussetzungsarmen Aufgaben kaum eine Rolle spielen.

Ziel bei der Entwicklung des integrativen Rahmenmodells ist es, den spezifizierten Unterschieden bei der Entstehung von Sequenzeffekten für voraussetzungsarme Aufgaben einerseits (aktivationsbasiertes Lernen bei der Aufgabenbearbeitung, automatischer Transfer) und voraussetzungsreichen Aufgaben andererseits (symbolisches Lernen bei der Aufgabenbearbeitung, nicht-automatischer Transfer) innerhalb *eines* Modells gerecht zu werden, ohne damit die Präzision der einzelnen Erklärungsansätze zu gefährden.

Daher wird in **Kapitel 3** die Entstehung von Sequenzeffekten für beide Aufgabenarten aus der Perspektive der kognitiven Architektur ACT (Anderson, 1983, 1993; Anderson & Lebiere, 1998) analysiert, die für sich beansprucht, sowohl elementare Informationsverarbeitungsprozesse als auch komplexe Wissenserwerbs- und Problemlöseprozesse beschreiben zu können.

Der Prozess des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung kann mit Hilfe von ACT als Veränderung der symbolischen und subsymbolischen Repräsentation deklarativer und prozeduraler Inhalte dargestellt werden. Die Architektur erscheint geeignet, um sowohl Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben als auch Lernen bei der schemabasierten Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben zu beschreiben, wenn man bestimmte Zusatzannahmen bezüglich der Repräsentation von Aufgabenschemata akzeptiert. Beide Lernprozesse basieren dann auf der Anwendung von Regeln zur Aufgabenbearbeitung, die spezifisch für eine Aufgabe oder für eine

Aufgabenklasse sind. Für Lernprozesse, die auf der analogen Nutzung konkreter deklarativer Wissensrepräsentationen – und nicht auf dem Einsatz aufgabenspezifischen Regelwissens – beruhen, fehlen dagegen in ACT Beschreibungsmöglichkeiten und zwar insbesondere, weil analoge Lern- und Problemlöseprozesse nicht oder nur unzureichend in ACT dargestellt werden können.

Daraus ergibt sich auch, dass lediglich ein – für voraussetzungsarme Aufgaben angenommener – automatischer *Transfer* auf der Basis übereinstimmender prozeduraler Wissensbestände in ACT relativ erfolgreich dargestellt werden kann (Singley & Anderson, 1989). Dagegen sind die in ACT getroffenen Annahmen zu einem – für voraussetzungsreiche Aufgaben angenommenen – analogen Transfer auf der Basis deklarativer Aufgabenrepräsentationen unzureichend, da sie entscheidende Teilprozesse wie die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgabenrepräsentationen als Voraussetzung für Transfer nicht spezifizieren.

Daher wird in einem letzten Schritt in der Entwicklung eines integrativen Rahmenmodells versucht, auf Theorien und empirischen Befunden zum analogen Transfer aufzubauen, um eine Analyse der Bedingungen vorzunehmen, die gegeben sein müssen, damit es zu einem erfolgreichen analogen Transfer – als eine Voraussetzung für die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben – kommt. Basierend auf den Ergebnissen der bisher genannten Analyseschritte wird abschließend das integrative Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten formuliert. Nach diesem Rahmenmodell beeinflusst eine Anordnung zu bearbeitender Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität und nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit das Entstehen von Sequenzeffekten, wobei zusätzlich die für voraussetzungsreiche Aufgaben sehr bedeutsamen Ausprägungen lösungsirrelevanter Oberflächenmerkmale berücksichtigt werden müssen. Weiterhin wird angenommen, dass Sequenzeffekte für voraussetzungsreiche Aufgaben nicht automatisch entstehen, sondern davon abhängen, ob ein Problemlöser potenziell vorhandene strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben erkannt hat. Dementsprechend sollten Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten das Auftreten von Sequenzeffekten beeinflussen. Schließlich wird von einer Moderation von Sequenzeffekten durch die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens ausgegangen. Die Annahmen zur Bedeutsamkeit von Oberflächenmerkmalen, von Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten sowie von domänenspezifischem Vorwissen werden benötigt, um den besonderen Eigenschaf-

ten voraussetzungsreicher im Gegensatz zu voraussetzungsarmen Aufgaben gerecht werden zu können. Diese das integrative Rahmenmodell ausmachenden Annahmen bilden den Gegenstand der eigenen empirischen Untersuchungen.

In **Kapitel 4** wird schließlich die strategische Nutzung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung erörtert. Wenn sich nämlich Bearbeitungssequenzen bezüglich der resultierenden Problemlöseperformanz unterscheiden, dann besteht eine Möglichkeit zur Verbesserung der eigenen Leistung bei der Aufgabenbearbeitung darin, eine günstige Bearbeitungsreihenfolge zu wählen. Bedingungen für den (erfolgreichen) Einsatz derartiger Aufgabensequenzierungen im Sinne einer metakognitiven Problemlösestrategie werden aufbauend auf der in Kapitel 3 vorgenommenen kognitionswissenschaftlichen Analyse von Sequenzeffekten erörtert. Dabei wird sowohl der Frage nachgegangen, unter welchen Bedingungen es überhaupt zu einer Aufgabensequenzierung kommen sollte (Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung) als auch, welche kognitiven Voraussetzungen für ihren erfolgreichen Verlauf gegeben sein müssen.

Im Anschluss an diesen theoretischen Teil der Arbeit werden in **Kapitel 5** zunächst die Ergebnisse einer Fragebogenstudie berichtet, mit deren Hilfe gezeigt wird, dass Problemlöser erstens von einer Abhängigkeit der Problemlöseperformanz von der Reihenfolge, in der multiple Aufgaben bearbeitet werden, ausgehen. Dabei werden solche Bearbeitungssequenzen als leistungsförderlich eingeschätzt, in denen die zu bearbeitenden Aufgaben entweder ausschließlich nach ihrer Komplexität von leicht nach schwer angeordnet sind oder in denen zusätzlich zur Aufgabenkomplexität eine Anordnung nach der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgaben vorgenommen wird. Zweitens gibt eine Großzahl der Problemlöser an, eine Wahl einer eigenen Reihenfolge für die Aufgabenbearbeitung vorzunehmen. Die Auswahl der am Anfang zu bearbeitenden Aufgabe wird dabei vor allem durch die Aufgabenschwierigkeit bestimmt, so dass ein Beginn mit leicht zu lösenden Aufgaben bevorzugt wird. Die Auswahl nachfolgender Aufgaben für die Bearbeitung wird ebenfalls an der Aufgabenschwierigkeit der Aufgaben ausgerichtet, als zusätzlich bedeutsam – wenn auch in geringerem Ausmaß – wird die strukturelle Ähnlichkeit zu vorangegangenen Aufgaben eingeschätzt. Die Tatsache, dass Problemlöser sowohl von der Existenz von Sequenzeffekten als auch von der Möglichkeit der strategischen Beeinflussung der Problemlöseperformanz durch Sequenzierung überzeugt sind, bildet eine entschei-

dende Voraussetzung für die experimentelle Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten.

In **Kapitel 6** wird mit Hilfe einer ersten Experimentalserie zur Bearbeitung von Algebreaufgaben in Übereinstimmung mit dem spezifizierten Rahmenmodell gezeigt, dass die Bearbeitungsreihenfolge von Aufgaben, deren Oberflächen- und Strukturmerkmale systematisch variiert werden, für die Entstehung von Sequenzeffekten bedeutsam ist. Diese Variation besteht darin, dass Aufgaben aus drei Aufgabenkategorien (definiert durch eine bestimmte Konfiguration der Strukturmerkmale) mit drei verschiedenen semantischen Einbettungen vollständig gekreuzt werden, so dass Aufgaben innerhalb einer Aufgabenkategorie jeweils unterschiedliche semantische Einbettungen aufweisen, während über die verschiedenen Aufgabenkategorien hinweg jeweils die gleichen semantischen Einbettungen verwendet werden.

Nach den Ergebnissen der ersten Experimentalserie führt eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz zu besseren Problemlöseleistungen als eine nach Strukturmerkmalen geblockte Sequenz, indem sie die strukturellen Unterschiede aufeinander folgender Aufgaben in dieser Sequenz betont. Die Überlegenheit einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Bearbeitungssequenz kann auf ihre bessere Eignung für Lernprozesse bei der Aufgabebearbeitung zurückgeführt werden. Diese kommt auch in besseren Problemlöseleistungen bei der anschließenden Bearbeitung von Transferaufgaben zum Ausdruck, deren Lösung das Vorhandensein flexiblen und adaptierbaren Wissens über Strukturmerkmale voraussetzt. Liegt dagegen bereits Wissen über strukturelle Aufgabenmerkmale vor, kommt es zu einer Umkehrung dieses Sequenzeffekts. In diesem Fall können Problemlöser von einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz profitieren, indem sie analoge Transferprozesse zwischen aufeinander folgenden, oberflächlich unähnlichen Aufgaben zum Einsatz bringen. Diese Befunde unterstützen damit auch die Annahme, dass domänenspezifisches Vorwissen die Entstehung von Sequenzeffekten moderiert.

Da sich in diesen papierbasiert durchgeführten Experimenten nur eine geringe Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung abzeichnet, so dass die diesbezüglich resultierenden Daten nur bedingt interpretiert werden können, wird für die in **Kapitel 7** beschriebene zweite Experimentalserie eine computerbasierte Lern- und Problemlöseumgebung zur Kombinatorik verwendet. Von dieser kann vermutet werden, dass sie zu einer intensiveren Nutzung von Aufgabensequenzierung als Problemlösestrategie

führt, da in dieser Umgebung im Gegensatz zu den papierbasierten Experimentalmaterialien eine Aufgabensequenzierung mit geringeren Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen verbunden sein sollte. Außerdem wird in dieser Experimentalserie neben der strukturellen Ähnlichkeit der zu bearbeitenden Aufgaben deren relative Komplexität manipuliert – eine Variable, die nach den Ergebnissen der Fragebogenstudie entscheidend für die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung ist.

In den Experimenten zur computerbasierten Bearbeitung von Kombinatorikaufgaben kann gezeigt werden, dass eine Aufgabensequenz, in der strukturell ähnliche Aufgabenkategorien nacheinander präsentiert wurden und in der Aufgaben einer Aufgabenkategorie nach zunehmender Komplexität angeordnet waren, in besseren Problemlöseleistungen resultiert als eine Aufgabensequenz, in der strukturell unähnliche Aufgabenkategorien nacheinander folgen und innerhalb einer Aufgabenkategorie komplexe vor einfachen Aufgaben dargeboten werden. Allerdings ist dieser Sequenzeffekt nur in Verbindung mit einer Instruktion zur möglichen Sequenzierung der Aufgaben nachweisbar und stellt sich nicht automatisch als Folge einer für Lern- und Transferprozesse günstigen Aufgabenabfolge ein. Schließlich kann nachgewiesen werden, dass das Sequenzierungsverhalten der Versuchspersonen an die Qualität der Präsentationssequenz adaptiert ist, indem Umsequenzierungen der vorgegebenen Aufgabensequenz unabhängig vom domänenspezifischen Vorwissen vor allem bei einer ungünstigen Abfolge vorgenommen werden. Eine Aufgabensequenzierung ist dabei vor allem für Versuchspersonen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen mit Leistungsverbesserungen assoziiert und zwar unabhängig davon, ob von einer a priori als günstig oder als ungünstig definierten Aufgabensequenz abgewichen wird. Dieser Befund sowie weitere Ergebnisse unterstützen eine Interpretation, wonach die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung eine allgemeine Förderung des Wissenserwerbs und der Problemlöseperformanz bewirkt, indem Elaborations- und Vergleichsprozesse angeregt werden. Darüber hinaus gibt es Befunde, die darauf hindeuten, dass es zusätzliche Effekte einer Aufgabensequenzierung gibt, die durch die Art der vorgegebenen Präsentationssequenz moderiert werden.

Diese Ergebnisse werden in **Kapitel 8** vor dem Hintergrund des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten und darauf aufbauenden Annahmen zur Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie diskutiert.

1. Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben

Sequenzeffekte ergeben sich, wenn die Performanz bei der Bearbeitung mehrerer Aufgaben in Abhängigkeit von der vorgegebenen Reihenfolge variiert, in der diese Aufgaben bearbeitet werden. Im vorliegenden Kapitel werden empirische Befunde zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung so genannter voraussetzungsarmer Aufgaben (*knowledge-lean problems* nach VanLehn, 1989) beschrieben. Diese Aufgaben sind dadurch charakterisiert, dass ihre Bearbeitung nur wenig domänenspezifisches Vorwissen voraussetzt. Stattdessen können sie auf der Basis der in der Aufgabenstellung und in der Instruktion enthaltenen Informationen gelöst werden, und für ihre Bearbeitung müssen nur eine geringe Anzahl von Regeln eingesetzt werden.

Es werden im Folgenden drei verschiedene Klassen voraussetzungsarmer Aufgaben – elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben, Induktionsaufgaben und Transformationsaufgaben – herangezogen, um Sequenzeffekte bei der Aufgabenbearbeitung zu beschreiben. Diese Sequenzeffekte ergeben sich aus dem Vergleich von Bearbeitungssequenzen, bei denen die Anordnung der Aufgaben entsprechend ihrer *strukturellen Ähnlichkeit* oder ihrer *relativen Komplexität* variiert wurde. Beide Merkmale von Aufgabenbeziehungen sollen zunächst kurz definiert werden:

- *Strukturelle Ähnlichkeit*: Von struktureller Identität oder Isomorphie zweier Aufgaben wird im Folgenden immer dann gesprochen, wenn die Aufgaben in die gleiche Aufgabenkategorie fallen und damit unter Anwendung der gleichen Lösungsprozedur lösbar sind. Welcher Aufgabenkategorie eine Aufgabe angehört und welche Prozedur zu ihrer Lösung daher eingesetzt werden muss, wird durch die so genannten Strukturmerkmale der Aufgabe festgelegt (Blessing & Ross, 1996; Catrambone, 1998; Gick & Holyoak, 1983; Ross, 1984, 1987, 1989a, b; Ross & Kilbane, 1997; VanLehn, 1989). Je geringer die Übereinstimmung zweier Aufgaben hinsichtlich ihrer Strukturmerkmale ist, desto geringer ist damit die strukturelle Ähnlichkeit der Aufgaben. In der Literatur finden sich sowohl Ansätze, in denen strukturelle Ähnlichkeit über die Übereinstimmung der Lösungsprozeduren definiert wird (prozedurale Ähnlichkeit nach Chen, 2002) als auch Ansätze, in denen die Übereinstimmung der Strukturmerkmale betont wird (deklarative Ähnlichkeit nach Chen, 2002). Diese Unterscheidung ist aus einer objektiven, aufgabenanaly-

tischen Perspektive bedeutungslos, da eine Übereinstimmung der Strukturmerkmale automatisch eine Übereinstimmung der Lösungsprozeduren mit sich bringt. Sie hat jedoch bestimmte Implikationen für die Ableitung von Vorhersagen darüber, wie bzw. wann Wissen, welches in einer Ausgangssituation erworben bzw. eingesetzt wurde, auf eine nachfolgende Zielsituation übertragen wird (vgl. Abschnitt 2.2.2; Hasselhorn & Mähler, 2000; Mayer & Wittrock, 1996). Die Bedeutung struktureller Ähnlichkeit für den Transferprozess stellt ein zentrales Thema dieser Arbeit dar.

- *Relative Komplexität*: Posner und Strike (1976) charakterisieren solche Aufgaben als komplex, die (1) ein hohes Maß an Diskriminationsfähigkeit verlangen, (2) schnell ausgeführt werden müssen und/oder (3) hohe mentale Kapazitätsanforderungen stellen. Bei letzteren sind insbesondere Gedächtnisanforderungen wichtig, die sich ergeben, wenn eine Vielzahl von Elementen parallel im Arbeitsgedächtnis aktiviert sein muss, um eine Aufgabe zu lösen (vgl. *element interactivity*; Sweller et al., 1998). Bei diesen Elementen kann es sich einerseits um Repräsentationen der Aufgabeneigenschaften handeln und andererseits um Wissens Elemente (z. B. Fakten und Prozeduren), die für die Aufgabenbearbeitung aus dem Langzeitgedächtnis ins Arbeitsgedächtnis abgerufen werden müssen. Bei Aufgabenkomplexität handelt es sich, wie man bereits dem Definitionsversuch von Posner und Strike (1976) entnehmen kann, um ein mehrdimensionales Konstrukt, d.h. Unterschiede in der Komplexität können sich durch die Variation verschiedener Aufgabenmerkmale ergeben (Day, 1956; Ellis, 1965).

Es wird in dieser Arbeit dem Begriff ‚Komplexität‘ gegenüber ‚Aufgabenschwierigkeit‘ der Vorzug gegeben, da der Komplexitätsbegriff stärker mit objektivierbaren Merkmalen der Aufgabe assoziiert ist. Aufgabenschwierigkeit ist dagegen stark durch den Vorwissensstand derjenigen Person mitdefiniert, die mit der Aufgabe konfrontiert wird und wird häufig nur als operationales Konstrukt verstanden, das sich an der Anzahl der gemachten Fehler und/oder der benötigten Zeit festmachen lässt. Es wird jedoch an dieser Stelle nicht davon ausgegangen, dass es sich dabei um eine trennscharfe Abgrenzung handelt. Beispielsweise sind die Gedächtnisanforderungen, die durch eine Aufgabe resultieren, für Experten in der entsprechenden Domäne deutlich geringer, da diese im Gegensatz zu Novizen über hoch effiziente Wissensstrukturen verfügen, die es ihnen ermöglichen, einzelne Elemente einer Aufgabe als Ganzes zu repräsentieren und damit eine Reduktion der *Komplexität* zu erzielen (Chase & Si-

mon, 1973, DeGroot, 1965; Miller, 1956; Simon & Chase, 1973; Sweller et al., 1998). Gleichzeitig ist diese Aufgabe für Experten jedoch auch leichter lösbar als für Novizen.

Häufig wird anhand der Schwierigkeit der zu bewältigenden Anforderungen zwischen einfachen ‚Aufgaben‘ einerseits und schwierigen ‚Problemen‘ andererseits unterschieden. Nach der ursprünglichen Konzeption von Newell und Simon (1972) können Probleme durch drei Eigenschaften beschrieben werden, nämlich durch einen Ausgangszustand, einen Zielzustand und eine Menge von Operatoren, die dazu dienen, den Ausgangszustand in den Zielzustand zu überführen. Entscheidend für die Definition eines Problems ist, dass die zur Transformation des Ausgangszustandes in den Zielzustand einzusetzenden Operatoren nicht auf den ersten Blick offensichtlich sind, sondern zunächst durch mehr oder weniger aufwändige Prozesse gesucht werden müssen (Dörner, 1989; Duncker, 1935; Lürer & Spada, 1992). Im Folgenden wird für alle Anforderungen soweit wie möglich der Begriff „Aufgabe“ verwendet, und entsprechende Aufgaben werden als „einfach“ oder „komplex“ gekennzeichnet, wobei die Abgrenzung zwischen beiden Polen anhand verschiedener Dimensionen geschehen kann (siehe oben). Die überwiegende Verwendung des Aufgabenbegriffs geschieht unter anderem, um Missverständnisse zu vermeiden, welche durch die im angloamerikanischen Raum häufige und oftmals undifferenzierte Verwendung des Begriffs ‚Problem‘ zustande kommen. Beispielsweise werden dort häufig für die Versuchspersonen einfach zu lösende mathematische Aufgaben entgegen der oben gegebenen Definition als ‚*problems*‘ bezeichnet, während andererseits unter bestimmten Bedingungen unlösbare Aufgaben als ‚*tasks*‘ gekennzeichnet werden. Es erscheint daher sinnvoller, sämtliche Anforderungen einheitlich zu bezeichnen und qualitative Unterschiede zwischen diesen Anforderungen durch entsprechende Attribute zu kennzeichnen.

Die in diesem Kapitel berichteten Befunde zu Sequenzeffekten bei voraussetzungsarmen Aufgaben wurden an drei unterschiedlichen Aufgabenklassen gewonnen:

- Bei *elementaren Reiz-Reaktions-Aufgaben* wird eine Person gebeten, auf elementare Reize, die nur hinsichtlich weniger Merkmalsdimensionen (z.B. Größe, Farbe oder Form eines Objekts) variiert werden, nach einer vorgegebenen Instruktion eine einfache Reaktion auszuführen, die nur wenig Zeit in Anspruch nimmt (z.B. Betätigen einer Taste). Sowohl die möglichen Reizvariationen als

auch die Zuordnung eines Reizes zu einer Verhaltensreaktion sind dabei durch das Untersuchungssetting und die Instruktion festgelegt. Reaktionsvarianz ergibt sich im Wesentlichen aus der Schnelligkeit, mit der auf einen Reiz reagiert wird. Reaktionszeiten für die Ausführung einer falschen Reaktion (Fehler) werden oft nicht mit in die Analysen einbezogen. Sequenzeffekte für diese Aufgabenklasse werden in Abschnitt 1.1 dargestellt.

- Bei *Induktionsaufgaben* ist die Identifikation von Gesetzmäßigkeiten gefragt, die zwischen verschiedenen Stimuli bestehen. Diese Identifikation geschieht auf der Basis der Darbietung mehrerer Reizkonfigurationen, die Instanzen der zu erkennenden Regel darstellen. Als abhängige Variable werden auch hier überwiegend Reaktionszeiten erfasst, zusätzlich wird die Anzahl der Instanzen, die dargeboten werden muss, um die Regel zu erkennen, als Leistungsmaß registriert. Sequenzeffekte für diese Aufgabenklasse werden in Abschnitt 1.2 beschrieben.
- Unter *Transformationsaufgaben* versteht man eine Gruppe von klassischen Problemlöseaufgaben wie z.B. die Wasserumfüllaufgaben von Luchins (1942; Luchins & Luchins, 1959) oder den Turm von Hanoi (Anzai & Simon, 1979; Kotovsky, Hayes & Simon, 1985; Newell & Simon, 1972; Simon, 1975), die dadurch gekennzeichnet sind, dass sie nur eine endliche Menge von Zuständen annehmen können, auf die eine sehr begrenzte Menge von Operatoren angewendet werden kann, um den Ausgangszustand der Aufgabe in den Zielzustand zu transformieren (Greeno, 1978). Transformationsaufgaben werden in der Regel unter Verwendung so genannter domänenunspezifischer suchbasierter Problemlösemethoden wie z.B. der Mittel-Ziel-Analyse bewältigt (Newell & Simon, 1972). Diese Art der Aufgabenbearbeitung bzw. des Problemlösens wird als Suche nach geeigneten Operatoren in einem Problemraum beschrieben, deren Anwendung zu einer (schrittweisen) Reduktion der Differenz zwischen dem Ausgangszustand und dem angestrebten Zielzustand beiträgt. Befunde zu Sequenzeffekten für diese Aufgabenklasse werden in Abschnitt 1.3 berichtet.

Die für diese Aufgabenklassen nachgewiesenen Sequenzeffekte bestehen darin, dass einerseits solche Bearbeitungssequenzen leistungsförderlich sind, in denen strukturell ähnliche Aufgaben (im Vergleich zu strukturell unähnlichen Aufgaben) aufeinander folgen und dass andererseits bessere Bearbeitungsleistungen resultieren, wenn Aufgaben gemäß ihrer Komplexität zunehmend im Vergleich zu abnehmend

angeordnet sind. Nicht für alle Aufgabenklassen sind jedoch beide Arten von Sequenzeffekten untersucht oder nachgewiesen worden.

Im Anschluss an die Darstellung von Sequenzeffekten für diese drei Aufgabenklassen wird in Abschnitt 1.4 versucht, eine einheitliche Beschreibung für die Prozesse zu finden, die für Sequenzeffekte bei voraussetzungsarmen Aufgaben verantwortlich sind. Es wird dabei angenommen, dass an der Entstehung von Sequenzeffekten zwei Teilprozesse beteiligt sind, nämlich *Lernen bei der Aufgabenbearbeitung* und *Wissenstransfer*, hinsichtlich deren Effizienz sich verschiedene Bearbeitungssequenzen unterscheiden können. Für voraussetzungsarme Aufgaben besteht der Lernprozess vor allem in einer zunehmenden Aktivierung bearbeitungsrelevanten Wissens, und es wird davon ausgegangen, dass ein Transfer auf nachfolgende Aufgaben weitestgehend automatisch erfolgt.

Diese als Rahmenkonzeption bezeichnete Beschreibung wird in Kapitel 2 dahingehend überprüft, inwieweit die für voraussetzungsarme Aufgaben spezifizierten Prozesse hinreichend sind, um auch Sequenzeffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben zu erklären oder ob zusätzliche Prozesse angenommen werden müssen. Aufbauend auf dieser Analyse wird eine Erweiterung der Rahmenkonzeption durch Prozesse vorgeschlagen, die nicht ausschließlich aktivationsbasiert und automatisch ablaufen, um zu erklären, warum Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben möglicherweise nur unter bestimmten Bedingungen auftreten.

1.1 Bearbeitung elementarer Reiz-Reaktions-Aufgaben im Rahmen des Taskshift-Paradigmas

Sequenzeffekte bei der Bearbeitung elementarer Reiz-Reaktions-Aufgaben werden im Rahmen des so genannten Taskshift-Paradigmas untersucht, um Aufschluss über solche kognitive Prozesse zu erhalten, die der menschlichen Handlungssteuerung zugrunde liegen. Diese Prozesse werden unter dem Sammelbegriff der exekutiven Prozesse zusammengefasst. Sie dienen der adaptiven Koordination kognitiver Verarbeitungsschritte und laufen entweder *vor* der eigentlichen Verarbeitung interner oder externer Stimuli ab, um so einer zielgerichteten Reizverarbeitung und Handlungssteuerung den Weg zu bereiten, oder werden *ergänzend* zu den eigentlichen

Informationsverarbeitungsprozessen eingesetzt, um diese zu selektieren, zu kontrollieren und zu regulieren (Kluwe, 1997; Kramer, Hahn & Gopher, 1999).

Exekutive Prozesse spielen unter anderem eine Rolle, wenn das kognitive System von der Bearbeitung einer Aufgabe zu der Bearbeitung einer nachfolgenden andersartigen Tätigkeit umgestellt werden muss, und dienen dann dazu, die für die eigentliche Bearbeitung der Aufgaben benötigten Prozesse zu koordinieren und zu konfigurieren. Dabei wird angenommen, dass die zur Erledigung einer Tätigkeit benötigten kognitiven Elemente (z.B. Repräsentationen zu beachtender Reizdimensionen, elementare Prozeduren) in Form so genannter *task-sets* (Rogers & Monsell, 1995) repräsentiert sind. Strukturell identische Aufgaben können somit durch Einsatz des gleichen *task-sets* bewältigt werden, während Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien bzw. unterschiedlichen Typs mit Hilfe unterschiedlicher *task-sets* gelöst werden.

Zentral für die Forschung im Rahmen des Taskshift-Paradigmas ist der Befund, dass der Wechsel zwischen Aufgaben verschiedenen Typs (d.h. der Wechsel zwischen verschiedenen *task-sets*) im Vergleich zur wiederholten Ausführung von Aufgaben des gleichen Aufgabentyps bestimmte kognitive Kosten, so genannte Wechselkosten, verursacht.

Das experimentelle Paradigma geht dabei auf eine Vorgehensweise zurück, die bereits von Jersild (1927) eingesetzt wurde. Jersild verwendete für seine Studien unter anderem einfache Arithmetikaufgaben, bei denen für jeweils zweistellige Zahlen unter Einsatz der Operatoren Addition und Subtraktion ein Resultat bestimmt werden musste. Beispielsweise musste bei einem Aufgabentyp jeweils eine "6" zu der vorgegebenen zweistelligen Zahl addiert werden, während bei Aufgaben des zweiten Typs die Zahl "3" von dem Stimulus subtrahiert werden sollte. Verglichen wurde die Leistung von Versuchspersonen bei der Bearbeitung von zwei verschiedenen und nicht durch die Versuchsperson veränderbaren Aufgabenabfolgen, deren Verwendung für das Taskshift-Paradigma typisch ist: Im geblockten Präsentationsmodus werden strukturidentische Aufgaben eines Typs hintereinander bearbeitet und Blöcke der unterschiedlichen Aufgabentypen (A und B) wechseln sich ab (z.B. AAAABBBB). In der alternierenden Liste werden hingegen Aufgaben verschiedenen Typs abwechselnd hintereinander präsentiert, so dass ein Aufeinanderfolgen von Aufgaben des gleichen Typs ausgeschlossen wird (z.B. ABABABAB). Jersild (1927) konnte als erster Sequenzeffekte für diese beiden Aufgabenabfolgen nachweisen, die darin beste-

hen, dass alternierende Aufgabenlisten im Vergleich zu geblockten Listen mit längeren Bearbeitungszeiten assoziiert sind. Diese Wechselkosten konnten in der Folgezeit mehrfach bestätigt werden und bilden die Basis für sämtliche Nachfolgeuntersuchungen im Rahmen des Taskshift-Paradigmas.

Spector und Biederman (1976) replizierten in ihren Untersuchungen einen weiteren Befund Jersilds (1927), der darin besteht, dass der Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben erleichtert wird, wenn die Stimuli, auf die reagiert werden soll, bereits hinreichende Informationen über die Art der auszuführenden Handlung enthalten. Beispielsweise mussten sowohl Jersilds Versuchspersonen als auch die von Spector und Biederman in einer experimentellen Anordnung alternierende Aufgabenlisten bearbeiten, in denen abwechselnd eine Zahl oder ein Wort als Stimulus dargeboten wurde. Bei Präsentation eines numerischen Stimulus musste eine Addition einer Ziffer zu dem Stimulus vorgenommen werden, während bei Präsentation eines Wortes das Antonym zu diesem Wort benannt werden sollte. Für dieses Material ergaben sich keine Wechselkosten beim Vergleich einer alternierenden mit einer geblockten Bearbeitungssequenz (Jersild, 1927; Spector & Biederman, 1976). Nach Rogers und Monsell (1995) kommt es in diesem Fall zu einer exogenen Kontrolle der Handlungsausführung, die durch eine Verknüpfung der Reizrepräsentation mit ebenfalls im Gedächtnis gespeicherten Handlungsplänen erklärt werden kann (Norman & Shallice, 1986). Durch die wahrnehmungsbedingte Aktivierung der Reizrepräsentation wird das damit assoziierte Handlungsschema automatisch mit aufgerufen und kann zur Ausführung gelangen (*contention scheduling*), so dass zusätzliche reizunabhängige exekutive Kontrollprozesse wesentlich weniger beansprucht werden.

Erklärung von Wechselkosten auf der Basis von Aktivationsmechanismen. In der aktuellen Forschung im Rahmen des Taskshift-Paradigmas sind vor allem zwei Ansätze prominent, die eine Erklärung für die Entstehung des oben beschriebenen Sequenzeffekts zu geben versuchen (vgl. für weitere Ansätze De Jong, 2001; De Jong, Berendsen & Cools, 1999; Rubinstein, Meyer & Evans, 2001). Der erste, von Rogers und Monsell (1995) entwickelte Erklärungsansatz beruht auf der Annahme aktiver Umkonfigurationsprozesse, während Allport, Styles und Hsieh (1994) sich für eine Erklärung von Wechselkosten auf der Basis passiver Interferenzprozesse aussprechen.

Rogers und Monsell (1995; Monsell, 1996) postulieren, dass Wechselkosten den zeitlichen Aufwand widerspiegeln, der sich aus der Notwendigkeit zur aktiven Rekonfiguration des *task-sets* ergibt, um den Anforderungen der neu zu initiierenden Handlung gerecht zu werden. Die Autoren gehen von der Existenz eines diskreten Prozesses aus, der vor Beginn einer neuen Tätigkeit vollständig abgeschlossen sein muss und nach einem einmal vollzogenen Handlungswechsel keine weiteren Auswirkungen auf die nachfolgende Ausführung von Tätigkeiten hat. Rogers und Monsell nehmen dabei an, dass dieser Prozess aus zwei Komponenten besteht, die jeweils in entsprechenden Kosten beim Aufgabenwechsel resultieren. Der erste Teilprozess (*endogeneous control*) besteht in einer antizipativen Vorbereitung der Bearbeitung einer neuen Aufgabe, die bereits vor der Reizpräsentation einsetzt. Die daraus resultierenden so genannten *Vorbereitungskosten* bilden eine Komponente von Wechselkosten, die reduziert bzw. auf Null gebracht werden kann, indem Versuchspersonen zwischen der Beendigung einer Tätigkeit und der Präsentation des nächsten Reizes hinreichend Zeit erhalten, sich auf einen Aufgabenwechsel einzustellen. Zusätzlich zu der Vorbereitung in Antizipation eines neuen Reizes gibt es eine weitere Prozesskomponente (*exogeneous control*), die erst dann einsetzen kann, wenn ein neuer Reiz präsentiert wurde. Diese Prozesskomponente ist für die Entstehung der so genannten *residualen Wechselkosten* verantwortlich. Rogers und Monsell (1995) charakterisieren diese Prozesskomponente durch die für ihr Einsetzen notwendige exogene Kontrolle, die erst durch das Vorliegen eines Aufgabenstimulus ausgelöst werden kann – während für die Initiierung vorbereitender endogener Kontrollprozesse lediglich die Antizipation eines neuen Reizes hinreichend ist. Entscheidend für den Erklärungsansatz von Rogers und Monsell (1995) ist, dass sie aktive, über die eigentliche Aufgabenbearbeitung hinausgehende Kontrollprozesse zur Steuerung des Aufgabenwechsels annehmen.

Allport und Kollegen (1994) vertreten dagegen einen Erklärungsansatz, der auf der Annahme proaktiver Interferenzprozesse (*proactive interference*) basiert. Nach dieser Erklärung kommt es bei der Bearbeitung einer Aufgabe *A* zu einer erhöhten Aktivierung der Reiz- und Reaktionscharakteristika dieser Aufgabe *A*, die im Falle eines anschließenden Wechsels zu einer Aufgabe anderen Typs *B* zu einer Interferenz mit den für diese Aufgabe *B* benötigten kognitiven Elementen führt. Die Autoren gehen dabei nicht davon aus, dass es einen einzelnen diskreten Zusatzmechanismus gibt, der den Aufgabenwechsel koordiniert und vor Beginn der Aufnahme einer

neuen Tätigkeit abgeschlossen sein muss. Vielmehr nehmen sie an, dass das kognitive System eine gewisse Trägheit aufweist, die ein Nachwirken von Reizverarbeitungsprozessen auf nachfolgende Tätigkeiten mit sich bringt (*task set inertia, TSI*) und dass durch diese Interferenz Kosten beim Aufgabenwechsel verursacht werden.

Es gibt allerdings verschiedene empirische Befunde, die für eine Rückführung des Sequenzeffekts auf die Notwendigkeit einer aktiven Umkonfiguration des verhaltenssteuernden *task-sets* und damit gegen ein rein passives Nachwirken aktivierter kognitiver Elemente sprechen:

Erstens lassen sich Wechselkosten durch eine Verlängerung des Reaktions-Stimulus-Intervalls innerhalb eines Zeitfensters von bis zu maximal 660 ms reduzieren (De Jong et al., 1999; Meiran, 1996; Rogers & Monsell, 1995), während Allport et al. (1994) vorhersagen, dass Manipulationen des Reaktions-Stimulus-Intervalls innerhalb dieses Zeitfensters keinen Einfluss auf das Ausmaß der Wechselkosten haben sollten. Zweitens findet eine Reduktion der Wechselkosten bei verlängertem Reaktions-Stimulus-Intervall nur dann statt, wenn die Länge des Reaktions-Stimulus-Intervalls antizipierbar ist (Rogers & Monsell, 1995). Nach Rogers und Monsell ist diese Antizipation notwendig, um das kognitive System auf einen Aufgabenwechsel in einer bestimmten Zeitspanne vorbereiten zu können. Dagegen sollte eine Interferenz durch passives Nachwirken voraktivierter Elemente nach Allport und Kollegen (1994) unabhängig von der Frage auftreten, ob der Zeitpunkt des Aufgabenwechsels antizipierbar ist oder nicht. Drittens lassen sich Wechselkosten nur für den ersten Trial eines Aufgabenblocks nach einem Aufgabenwechsel nachweisen und nicht für nachfolgende Trials (Rogers & Monsell, 1995), bei denen nach Allport und Kollegen (1994) jedoch noch eine Interferenz nachweisbar sein sollte. Dieser Befund spricht daher eher für einen diskreten Mechanismus, der vor der Bearbeitung der Aufgabe eines anderen Typs abgeschlossen ist und dann keinen weiteren Einfluss mehr hat.

Dieser Befundlage entsprechend gibt es eine Reihe von Forschungsansätzen, die sich darum bemühen, diejenigen Teilprozesse zu identifizieren, die an einer Umkonfiguration des kognitiven Systems beteiligt sind. Eine gängige Vorstellung bezüglich der beteiligten Prozesse ist dabei, dass die Handlungssteuerung bei einem Aufgabenwechsel durch Prozesse der Deaktivierung des nicht mehr benötigten *task-sets* und der Aktivierung des *task-sets* zur Bearbeitung der neuen Aufgabe gewährleistet wird (Kramer et al., 1999). Bezüglich dieser Deaktivierungs- und Aktivierungsprozesse existieren unterschiedliche Vorstellungen darüber, ob eine Aktivierung des im

nächsten Schritt benötigten *task-sets* zusammen mit einem passiven Abflachen des Aktivationsniveaus des *task-sets* der vorangegangenen Handlung (*decay of activation*) ausreichend ist, um einen Aufgabenwechsel einzuleiten (Allport et al., 1994; Altmann & Gray, 2000) oder ob zusätzliche, gezielt einsetzende Inhibitionsprozesse angenommen werden müssen (vgl. *backward inhibition* nach Mayr & Keele, 2000; Miyake et al., 2000; Li, Lindenberger, Rüniger & Frensch, 2000). Darüber hinaus wird diskutiert, ob zusätzliche, vermutlich nicht-aktivationsbasierte Prozesse des Zielmanagements und Zielwechsels zumindest für einen Teil der Wechselkosten verantwortlich gemacht werden können (De Jong, 2001; De Jong et al., 1999; Rubinstein et al., 2001).

Die im Taskshift-Paradigma gewonnenen Befunde unterstützen die Annahme, dass Bearbeitungssequenzen, bei denen Aufgaben gleichen Typs (d.h. strukturidentische Aufgaben) aufeinander folgen, in besseren Leistungen resultieren als alternierende Sequenzen. Diese Art von Sequenzeffekten basieren – auf der Auflösungs-ebene, auf der sie untersucht werden – vor allem auf Mechanismen der Aktivierung und Inhibierung kognitiver Elemente.

1.2 Bearbeitung von Induktionsaufgaben

Sequenzeffekte können auch für Aufgaben nachgewiesen werden, die den induktiven Erwerb einfacher Konzepte oder Regeln betreffen. Diese Aufgaben lassen sich gegenüber den im Taskshift-Paradigma verwendeten Aufgaben dadurch kennzeichnen, dass die verwendeten Stimuli relativ komplexer Natur sind. Für Induktionsaufgaben lassen sich sowohl Sequenzeffekte in Abhängigkeit von einer Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität als auch nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit nachweisen.

Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität. Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der relativen Komplexität der Aufgaben werden durch den Vergleich von Aufgabenreihenfolgen untersucht, die entweder nach zunehmender oder abnehmender Komplexität angeordnet sind um festzustellen, inwieweit die Bearbeitung von einfachen Aufgaben vor komplexeren Aufgaben des gleichen Aufgabentyps die Regelinduktion erleichtert. Für Induktionsaufgaben lassen sich Unterschiede zwischen den beiden Aufgabenabfolgen zugunsten der hinsichtlich der Komplexität zunehmenden Sequenz nachweisen:

The sequence effect occurs if subjects are able to solve a series of related problems graded according to difficulty more rapidly when the problems are presented in a simple-to-complex sequence rather than a complex-to-simple sequence. In extreme cases, subjects can solve a simple-to-complex sequence very rapidly but find the reverse sequence insoluble. This normally occurs because they are unable to solve the most complex problem if it is presented first.

(Sweller & Gee, 1978, S. 513)

Eine Reihe von Untersuchungen zur Überprüfung dieses komplexitätsabhängigen Sequenzeffekts im Bereich der Regelinduktion wurde von Sweller und Mitarbeitern durchgeführt (Sweller, 1976; 1980a, b; Sweller & Gee, 1978), wobei die postulierte Überlegenheit einer Anordnung von Reizkonfigurationen mit zunehmender Komplexität belegt werden konnte.

Beispielsweise wurden den Versuchspersonen in einem Experiment von Sweller (1976) Stimuli präsentiert, die jeweils aus zwei zweistelligen Zahlen bestanden. Den Versuchspersonen wurde mitgeteilt, dass sich aus der ersten dargebotenen Zahl durch Anwendung einer Regel die zweite Zahl errechnen lasse und dass es ihre Aufgabe sei, diese Regel zu entdecken. Für jede der zu entdeckenden Regeln wurden den Versuchspersonen jeweils maximal 40 Stimuli präsentiert. Die zu entdeckenden Regeln waren (in aufsteigender Komplexität): (a) Addition der ersten Ziffer zu der präsentierten Zahl (z.B. $43 \rightarrow 47$), (b) Addition der ersten Ziffer zu der präsentierten Zahl plus 1 (z.B. $43 \rightarrow 48$) und (c) Addition der ersten Ziffer zu der präsentierten Zahl plus 3 (z.B. $43 \rightarrow 50$). Sweller (1976) konnte zeigen, dass acht von zehn Versuchspersonen in einer an Komplexität zunehmenden Sequenz in der Lage waren, für die drei verschiedenen Aufgaben jeweils die korrekte Regel anzugeben. Sie benötigten dabei durchschnittlich eine Präsentation von 14,9 der 40 Stimuli bis zur Entdeckung der Regel. Dagegen waren lediglich zwei Versuchspersonen in der invertierten Sequenz in der Lage, alle Aufgaben zu lösen. Die übrigen acht Personen schafften es nicht, in den maximal 40 Versuchsdurchgängen die korrekte Regel für die zuerst präsentierte, komplexeste Aufgabe zu erkennen.

Dieser Nachweis eines positiven Transfers zwischen Aufgaben aufsteigenden Komplexitätsgrades konnte in einer weiteren Studie von Sweller (1980b) repliziert werden. Den Versuchspersonen wurden pro Aufgabe maximal 40 zweistellige numerische Stimuli nacheinander präsentiert, und sie mussten die numerische Reaktion

ermitteln, mit der sie auf jeden dieser Stimuli reagieren sollten. Die Regel der einfachsten Aufgabe bestand darin, auf jeden Stimulus der Aufgabe mit der gleichen Zahl zu reagieren. Bei komplexeren Aufgaben musste mit einer Sequenz von Zahlen reagiert werden, d.h. die richtige Reaktion auf Stimulus *A* war Reaktion *a*, auf Stimulus *B* musste mit Reaktion *b* reagiert werden etc. Wurde das Ende einer solchen Reaktionssequenz erreicht, musste beim nächsten Stimulus erneut mit dem ersten Element der Reaktionssequenz (*a*) geantwortet werden. Die Aufgabenkomplexität ergab sich damit aus der Länge der zu identifizierenden Reaktionssequenz, die in einfachen Fällen nur aus zwei Elementen bestand, so dass immer abwechselnd mit der einen oder mit der anderen Zahl auf einen Stimulus reagiert werden musste. Bei der komplexesten, als Kriteriumsaufgabe verwendeten Aufgabe bestand diese Reaktionssequenz aus sieben Zahlen.

Die Leistung für die Kriteriumsaufgabe wurde gemessen an der Anzahl der Durchgänge, die für die Regelinduktion benötigt wurde, sowie an der Zahl der Versuchspersonen, die die Aufgabe nicht lösen konnten. Es zeigte sich, dass die Regel der Kriteriumsaufgabe von keiner Versuchsperson inferiert werden konnte, wenn diese Aufgabe zuerst dargeboten wurde. Wurden jedoch fünf oder mehr nach ihrer Komplexität aufsteigend angeordnete Aufgaben zuvor bearbeitet, waren alle Versuchspersonen in der Lage, die korrekte Regel für die Kriteriumsaufgabe anzugeben. Sweller (1980b) konnte somit mit dieser Studie einen erneuten Nachweis für die Überlegenheit einer in der Komplexität zunehmenden Aufgabensequenz erbringen.

Zusätzlich wurde für Regelinduktionsaufgaben untersucht, welchen Einfluss die Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit hat.

Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit. Um Sequenzeffekte bei der Regelinduktion auch in Abhängigkeit von der strukturellen Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben untersuchen zu können, verglich Sweller (1980b) die Identifikationsleistungen für eine Kriteriumsaufgabe, wenn dieser entweder keine oder eine Reihe ähnlich erscheinender, aber anders zu lösender Aufgaben vorausgingen. Sweller konnte zeigen, dass die Bearbeitung einer Reihe ähnlicher Aufgaben zunehmender Komplexität die Leistung bei einer Kriteriumsaufgabe verschlechtern kann, wenn diese Kriteriumsaufgabe den vorangegangenen Aufgaben strukturell unähnlich ist. Die Regel der Kriteriumsaufgabe bestand darin, die beiden Ziffern eines zweistelligen Stimulus miteinander zu addieren. Diese Regel war für sich genommen

sehr einfach zu identifizieren und wurde dementsprechend von nahezu allen Versuchspersonen erkannt, wenn die entsprechende Aufgabe als erstes bearbeitet wurde. Lediglich eine von 13 Versuchspersonen war jedoch in der Lage, die Additionsregel zu identifizieren, wenn sie am Ende einer Sequenz von Aufgaben dargeboten wurde, denen eine *andere* Regel, nämlich das Befolgen einer numerischen Reaktionssequenz (siehe oben), zugrunde lag.

Dieser Befund von Sweller (1980b; vgl. auch Sweller & Gee, 1978) demonstriert den klassischen Einstellungseffekt (*set effect*, Luchins, 1942; Luchins & Luchins, 1959), wie er erstmals bei der Bearbeitung von Transformationsaufgaben (vgl. Abschnitt 1.3) gefunden wurde. Der Einstellungseffekt ist durch die Bevorzugung einer für die aktuelle Aufgabe suboptimalen Lösungsstrategie gekennzeichnet, die sich durch die vorherige häufige Anwendung dieser Lösungsstrategie ergibt. Der Effekt tritt vor allem dann auf, wenn Aufgaben eine hohe Oberflächenähnlichkeit zueinander aufweisen, so dass der Fehlschluss nahe gelegt wird, sie seien auch durch Anwendung der gleichen Lösungsprozedur lösbar. Der Einstellungseffekt wird auch als negativer Transfereffekt bezeichnet, da hier zuvor gemachte Erfahrungen nachfolgende Leistungen beeinträchtigen (Novick, 1988; Pennington & Rehder, 1995).

Zusammenfassend ergeben sich bei der Bearbeitung von Induktionsaufgaben deutliche Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität sowie nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit. Im Einzelnen konnte erstens gezeigt werden, dass die wiederholte Bearbeitung einfacher Aufgaben die anschließende Bearbeitung komplexerer Aufgaben erleichtert. Zweitens zeigte sich, dass die Bearbeitung einer an sich einfach lösbaren Kriteriums-aufgabe durch die vorherige Bearbeitung strukturell unähnlicher Aufgaben im Sinne des Einstellungseffekts erschwert wird. Für diese Aufgabenklasse lassen sich demnach deutliche Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität und strukturellen Aufgabenähnlichkeit nachweisen.

Erklärung des komplexitätsabhängigen Sequenzeffekts und des Einstellungseffekts im Rahmen der *Hypothesis Testing Theory*. Sweller und Mitarbeiter (Sweller, 1980a, b; Sweller & Gee, 1978) erklären sowohl den positiven Transfer zwischen Aufgaben zunehmender Komplexität als auch den negativen Transfer zwischen strukturell unähnlichen Aufgaben im Rahmen eines Ansatzes, bei dem die Überprüfung von Hypothesen als wesentliches Mittel zur Induktion einer Regel hervorgeho-

ben wird (*Hypothesis Testing Theory*; Glassman & Levine, 1972; Levine, 1975). Danach testen Personen bei der Bearbeitung einer Serie von Induktionsaufgaben, die als ähnlich wahrgenommen werden, zunächst diejenigen hypothetischen Regeln, die der bei der vorangegangenen Aufgabe erfolgreich angewendeten Regel möglichst ähnlich sind. Die vor der Bearbeitung einer Kriteriumsaufgabe stattfindende Bearbeitung anderer Aufgaben schränkt also den Hypothesensuchraum ein. Je mehr ähnliche Aufgaben zuvor gelöst wurden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe zunächst eine hypothetische Regel getestet wird, die den Regeln der vorangegangenen Aufgaben verwandt ist.

Besteht eine hinreichende Ähnlichkeit zwischen den vorangegangenen Aufgaben und der Kriteriumsaufgabe, so dass die Bearbeitung der Aufgabensequenz den Hypothesenraum auf eine Menge von Hypothesen reduziert, die auch die für die Lösung der Kriteriumsaufgabe korrekte Hypothese enthält, ist ein positiver Transfer zu erwarten. Diese Einschränkung des Hypothesensuchraums kann sich gerade bei sehr komplexen Aufgaben, als hilfreich erweisen, um den Prozess der Regelidentifikation zu erleichtern. Komplexe Induktionsaufgaben sind nach Sweller durch eine Vielzahl in Frage kommender Hypothesen gekennzeichnet, von denen die zur Lösung der Aufgabe benötigte Hypothese (Regel) nur eine geringe Salienz aufweist.

Dagegen beruht die Erklärung des Einstellungseffekts auf der Annahme, dass die Bearbeitung von Aufgaben, die der Kriteriumsaufgabe strukturell unähnlich sind, den Hypothesenraum auf eine Menge von Hypothesen reduziert, bei der die Hypothese, die sich für die Bearbeitung der Kriteriumsaufgabe eignen würde, nicht mehr enthalten ist. Auf diese Weise kann eine Kriteriumsaufgabe, die bei der Bearbeitung am Anfang einer Sequenz auf Grund salienter Lösungshypothesen sehr gut lösbar wäre, am Ende einer Sequenz von ihr unähnlichen Aufgaben nahezu unlösbar werden, da diese – unter anderen Umständen salienten – Hypothesen im Lösungsprozess nicht berücksichtigt werden (Glassman & Levine, 1972).

Der komplexitätsabhängige Sequenzeffekt und der Einstellungseffekt erweisen sich demnach als komplementär: Beim komplexitätsabhängigen Sequenzeffekt wird die zur Lösung einer Aufgabe benötigte Regel durch die vorherige Bearbeitung ähnlicher Aufgaben hervorgehoben, während umgekehrt beim Einstellungseffekt die zur Lösung der Kriteriumsaufgabe benötigte Regel aus dem Hypothesensuchraum ausgeschlossen wird und somit die Lösbarkeit dieser Kriteriumsaufgabe reduziert wird. In dem einen Fall bewirkt die vorherige Präsentation mehrerer Aufgaben eine Leis-

tungsverbesserung bei der Kriteriumsaufgabe, im anderen Fall eine Leistungsverschlechterung – in Abhängigkeit von der strukturellen Ähnlichkeit der Kriteriumsaufgabe zu den vorangegangenen Aufgaben:

Identical variations in preliminary problems either can transform a normally simple problem into an insoluble one or alternatively an insoluble problem into a simple one with the only alteration being in the degree of similarity between the hypotheses required for the initial problems and the critical problem.

(Sweller, 1980b, S. 237)

Zusammenfassend findet sich für Induktionsaufgaben somit, dass Sequenzen, deren Aufgaben entsprechend ihrer Komplexität aufsteigend und nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit geblockt angeordnet sind, zu besseren Leistungen führen, als solche Aufgabenabfolgen, bei denen dies nicht der Fall ist. Diese Sequenzeffekte werden zurückgeführt auf Suchprozesse, die sich in einem Hypothesenraum abspielen, in dem mögliche Regeln unterschiedlicher Salienz repräsentiert sind. Die Art und Anzahl bereits bearbeiteter Aufgaben verändert diesen Hypothesenraum bzw. die Salienz der darin enthaltenen Hypothesen und bestimmt so, welche Hypothesen bei nachfolgenden Aufgaben bevorzugt getestet werden.

Sweller lässt dabei offen, ob Sequenzeffekte bei der Bearbeitung von Induktionsaufgaben Resultat automatischer oder deliberativer Prozesse sind. Veränderungen der Salienz kognitiver Repräsentationen (Hypothesen), wie sie in diesem Erklärungsansatz postuliert werden, könnten jedoch sehr gut als Veränderungen der Aktivierung kognitiver Einheiten aufgefasst werden. Damit wären Sequenzeffekte innerhalb dieser Aufgabenklasse ebenso wie solche bei elementaren Reiz-Reaktions-Aufgaben im Wesentlichen Ergebnis von Aktivationsmechanismen, die den Output des Identifikationsprozesses bei nachfolgenden Aufgaben im Sinne eines automatischen Transfers bedingen.

1.3 Bearbeitung von Transformationsaufgaben

Transformationsaufgaben werden vor allem zur Analyse von domänenunspezifischen Problemlösemethoden wie z.B. der Mittel-Ziel-Analyse (Newell & Simon, 1972) eingesetzt und haben den Vorteil, dass sowohl die Aufgabenstellungen selbst als auch die zu ihrer Lösung eingesetzten Methoden einer formalen Beschreibung z.B. im

Rahmen von Produktionssystemarchitekturen sehr gut zugänglich sind (Anderson & Lebiere, 1998; Anzai & Simon, 1979; Atwood & Polson, 1976; Hayes & Simon, 1977; Kotovsky et al., 1985; Newell & Simon, 1972; Simon, 1975; Simon & Reed, 1976). Mit Hilfe formaler Analysen lässt sich unter anderem zeigen, dass viele der in diese Kategorie fallenden Aufgaben trotz sehr unterschiedlicher semantischer Einbettungen isomorph oder zumindest partiell isomorph sind. Auf Grund dieser hohen strukturellen Ähnlichkeit verschiedener Transformationsaufgaben wird davon ausgegangen, dass die erfolgreiche Bearbeitung einer Transformationsaufgabe für die Bearbeitung nachfolgender Transformationsaufgaben förderlich sein sollte, da Wissen, welches bei der Lösung der ersten Aufgabe erworben wurde, bei der nachfolgenden Bearbeitung weiterer Aufgaben angewendet werden kann.

Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität. Während bei den in Abschnitt 1.2 behandelten Induktionsaufgaben sehr deutliche Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität nachgewiesen werden können, ist die Bearbeitung von Transformationsaufgaben durch ein vollständiges Fehlen dieser Effekte gekennzeichnet. Im Anschluss an die Darstellung der Befunde für die zuletzt genannte Aufgabenklasse wird daher eine Erklärung präsentiert, die geeignet erscheint, diesen scheinbaren Widerspruch zwischen den Befundmustern aufzulösen.

Reed, Ernst und Banerji (1974) untersuchten den Transfer zwischen dem Missionare-Kannibalen Problem (MC: *Missionary-Cannibals* Problem) und dem Problem der eifersüchtigen Ehemänner (JH: *Jealous Husbands* Problem). Das (bekanntere) MC-Problem besteht darin, dass drei Kannibalen und drei Missionare mit einem Boot, welches maximal zwei Personen transportieren kann, auf die andere Seite eines Flusses gelangen wollen. Da die Kannibalen den Missionaren gefährlich werden könnten, dürfen sich zu keinem Zeitpunkt mehr Kannibalen als Missionare auf einer der Flussseiten aufhalten. Das JH-Problem ist dadurch gekennzeichnet, dass drei Frauen und ihre Ehemänner in einem zwei Personen aufnehmendem Boot den Fluss überqueren wollen, wobei sich niemals eine Frau in der Gegenwart anderer Männer aufhalten darf, ohne dass ihr Mann anwesend ist. Die Aufgaben sind partiell isomorph bzw. homomorph zueinander, da es beim JH-Problem zusätzliche Einschränkungen zu berücksichtigen gilt, die die Anzahl legaler Lösungsschritte reduzieren. Das heißt, es wird nicht nur das Zahlenverhältnis für verschiedene Personengruppen vorgeschrieben, sondern des Weiteren dürfen spezifische Personen nur gemeinsam

auftreten. Das JH-Problem ist durch diese zusätzlich zu berücksichtigenden Randbedingungen gleichzeitig komplexer als das MC-Problem, und Versuchspersonen benötigen bei seiner Bearbeitung dementsprechend mehr Zeit bis zur Lösung und machen mehr Fehler.

Reed und Mitarbeiter (1974) nahmen an, dass sich – auf Grund der hohen strukturellen Ähnlichkeit der Aufgaben untereinander – die erfolgreiche Bearbeitung einer dieser Aufgaben positiv auf die anschließende Bearbeitung der anderen Aufgabe auswirken sollte, da Lösungsstrategien, die sich aus der Bearbeitung der ersten Aufgabe ergeben haben, für die Lösung der zweiten Aufgabe herangezogen werden können. Versuchspersonen erhielten maximal 30 Minuten Zeit für die Bearbeitung beider Aufgaben, und als Leistungsparameter dienten die tatsächliche Bearbeitungszeit, die Anzahl benötigter Lösungsschritte sowie die Anzahl unerlaubter Lösungsschritte. Für diese abhängigen Variablen wurde in dieser und in den folgenden Studien jeweils das Vorhandensein von zwei verschiedenen Effekten überprüft: Einerseits wurde getestet, ob sich die in der vorliegenden Arbeit interessierenden Sequenzeffekte ergaben, d.h. ob sich die Gesamtmittelwerte für alle bearbeiteten Aufgaben in Abhängigkeit von der Bearbeitungssequenz unterschieden. Andererseits wurde die Existenz von Transfereffekten überprüft, indem für die verschiedenen Bearbeitungssequenzen das Ausmaß der Verbesserung bestimmt wurde, welche sich aus der Bearbeitung einer Aufgabe an zweiter Stelle im Vergleich zu ihrer Bearbeitung an erster Stelle ergab.

In Experiment I (Reed et al., 1974) bearbeiteten Versuchspersonen die beiden Aufgaben entweder in der Sequenz MC-JH oder JH-MC. Für keine der abhängigen Variablen war ein Sequenzeffekt nachweisbar. Auch der Nachweis eines Transfers zwischen den beiden Aufgaben fiel geringer aus als erwartet. Lediglich für die Anzahl unerlaubter Lösungsschritte ließ sich eine signifikante Interaktion zwischen der Aufgabensequenz und der Aufgabe nachweisen. Versuchspersonen führten jeweils weniger unerlaubte Lösungsschritte bei einer Aufgabe durch, wenn sie diese Aufgabe als zweite bearbeiteten im Vergleich zu ihrer Bearbeitung an erster Stelle. Weder bezogen auf die Lösungszeit noch auf die Gesamtzahl benötigter Lösungsschritte profitierten Versuchspersonen von der vorherigen Bearbeitung der homomorphen Aufgabe.

Eine mögliche Erklärung für diesen geringen Transfereffekt sahen Reed und Mitarbeiter (1974) darin, dass Versuchspersonen sich möglicherweise nicht ausreichend

an ihre Lösung der ersten Aufgabe erinnerten und dementsprechend dort gemachte Erfahrungen nicht nutzten. Sollte dies der Fall sein, sollten sich auch keine Übungseffekte bei der wiederholten Bearbeitung der gleichen Aufgabe ergeben. Ergebnisse des zweiten Experiments, bei dem Versuchspersonen entweder das Missionare-Kannibalen Problem oder das Problem der eifersüchtigen Ehemänner zweifach zu bearbeiten hatten, wiesen jedoch für alle Variablen mit Ausnahme der Anzahl benötigter Lösungsschritte deutliche Transfereffekte auf. Versuchspersonen konnten sich folglich ihre Erinnerung an die Lösung einer Aufgabe für die wiederholte Bearbeitung derselben Aufgabe durchaus zunutze machen. Der fehlende Transfereffekt in Experiment I ist demnach eher auf die mangelnde Fähigkeit der Versuchspersonen zurückzuführen, die strukturelle Ähnlichkeit zwischen den beiden Aufgaben wahrzunehmen. Um diese Annahme zu prüfen, wurden Versuchspersonen in Experiment III, das im Design mit Experiment I identisch war, auf die strukturelle Korrespondenz zwischen den beiden Aufgaben hingewiesen, und ihnen wurden die exakten Entsprechungen zwischen den Aufgaben mitgeteilt. Dieser Hinweis auf die Beziehungen zwischen den beiden Aufgaben erbrachte einen deutlichen Transfereffekt im Sinne einer Verringerung der Gesamtbearbeitungszeit und der Anzahl illegaler Lösungsschritte für die zweite Aufgabe, der allerdings davon abhängig war, welche der Aufgaben zuerst bearbeitet wurde. Während die anfängliche Bearbeitung des komplexeren Problems der eifersüchtigen Ehemänner zu einer deutlichen Reduktion der Bearbeitungszeit und der Anzahl illegaler Lösungsschritte für das nachfolgende Missionare-Kannibalen Problem führte, zeigten sich keinerlei Transfereffekte in umgekehrter Richtung. Wie in Experiment I ergaben sich keine Haupteffekte der Bearbeitungssequenz, d.h. keine der Sequenzen erwies sich überlegen im Hinblick auf die Gesamtleistung für beide Aufgaben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Transfer zwischen zwei verschiedenen Aufgaben in dieser Untersuchung nur dann festzustellen war, wenn Versuchspersonen auf die analogen Beziehungen zwischen den beiden Aufgaben explizit hingewiesen wurden und wenn die komplexere der beiden Aufgaben, nämlich das Problem der eifersüchtigen Ehemänner, zuerst dargeboten wurde. Eine Verbesserung der Gesamtleistung durch diese Bearbeitungssequenz im Sinne eines Sequenzeffekts war dagegen nicht feststellbar. Reed und Mitarbeiter (1974) liefern zwei mögliche Erklärungen für die Asymmetrie ihrer Befunde. Die erste Erklärung bezieht sich auf die Tatsache, dass die beiden Aufgaben homomorph zueinander sind, so

dass der Problemraum der komplexeren Aufgabe den Problemraum der einfacheren Aufgabe mit umfasst, während umgekehrt nicht alle Elemente des Problemraums der komplexeren Aufgabe in der Problemraumrepräsentation der einfacheren Aufgabe enthalten sind. Die Strategie, die bei der Bearbeitung einer komplexen Aufgabe erworben werden kann, ist demnach umfassender als die Vorgehensweise, die aus der anfänglichen Bearbeitung einer einfacheren Aufgabe resultiert, und damit besser auf nachfolgende Aufgaben übertragbar (*inclusiveness*; Reed, Ackinclose & Voss, 1990; Reed, Willis & Guarino, 1994). Entsprechend dieser Annahmen fällt der Transfer bei der Bearbeitung von Transformationsaufgaben in einer in der Komplexität abnehmenden Sequenz größer aus als in einer in der Komplexität zunehmenden Sequenz (Reed et al., 1974). Die zweite Erklärung bezieht sich darauf, dass die Versuchspersonen für die anfängliche Bearbeitung der komplexeren Aufgabe mehr Zeit verwendeten, so dass die anzuwendenden Problemlöseschritte besser erlernt wurden und damit auch besser auf die nachfolgende einfachere Aufgabe übertragen werden konnten (vgl. Hayes & Simon, 1977).

Eine weitere Studie zu möglichen Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Transformationsaufgaben wurde von Sweller (1976) durchgeführt, der Transfereffekte zwischen einer einfachen und einer komplexen Version des Turms von Hanoi untersuchte. Die beiden unterschiedlich komplexen Aufgabenvarianten (vier versus fünf Scheiben) wurden entweder in einer von einfach nach komplex angeordneten Aufgabensequenz oder in umgekehrter Abfolge dargeboten. Ähnlich wie bei Reed et al. (1974) ließ sich weder für die zur Bearbeitung beider Aufgabenvarianten benötigte Zeit noch für die Anzahl benötigter Lösungsschritte ein Sequenzeffekt nachweisen. Allerdings ergab sich in Einklang mit den Befunden von Reed et al. (1974) ein deutlicher Transfereffekt: Die Verbesserung, die sich durch die Bearbeitung einer Aufgabe an zweiter Stelle im Vergleich zu ihrer Bearbeitung am Anfang der Aufgabensequenz erzielt wurde, war größer, wenn zunächst die komplexere Variante des Turms von Hanoi dargeboten wurde, als wenn mit der Bearbeitung der einfachen Aufgabe begonnen wurde.

Diese Befunde konnten Hayes und Simon (1977) in ihrer Studie zu möglichen Sequenz- und Transfereffekten nur bedingt replizieren. Sie verwendeten in ihrer Untersuchung Aufgaben, die partiell isomorph zum Turm von Hanoi waren (so genannte *monster problems*). Die Autoren gaben ihren Versuchspersonen jeweils zwei unterschiedlich komplexe Varianten der *monster problems* in unterschiedlichen Reihenfol-

gen vor und bestimmten die Bearbeitungsleistungen für diese Aufgaben. Die Ergebnisse der Untersuchung von Hayes und Simon (1977) sind jedoch uneindeutig, da die beobachteten Transfereffekte nicht nur durch die Bearbeitungssequenz, sondern gleichzeitig auch durch die Art der Manipulation der Aufgabenkomplexität moderiert wurden. Diese war sehr stark an der semantischen Einbettung der Aufgaben orientiert, so dass eine Generalisierung der Befunde nicht möglich erscheint und auch von Hayes und Simon (1977) nicht vorgenommen wurde. Für spezifische Manipulationen der Aufgabenkomplexität ließen sich Transfereffekte zu Gunsten einer nach zunehmender Komplexität angeordneten Aufgabensequenz zeigen, die den Befunden von Reed und Mitarbeitern (1974) und Sweller (1976) somit widersprechen. Für andere Manipulationen der Aufgabenkomplexität ergab sich hingegen wiederum eine Bestätigung der Befunde von Reed und Mitarbeitern (1974) und Sweller (1976), wonach eine Anordnung der Aufgaben nach abnehmender Komplexität größere Transferwirkungen hervorrief als eine umgekehrte Abfolge. Hayes und Simon (1977) konnten ebenfalls keine Sequenzeffekte nachweisen.

Zusammenfassend lässt sich an diesem Punkt zunächst festhalten, dass bei der Bearbeitung von Transformationsaufgaben keine Sequenzeffekte im Hinblick auf die Gesamtbearbeitungsleistung in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer Komplexität feststellbar sind. Allerdings führt ein Beginn der Aufgabenbearbeitung mit komplexen Aufgaben meistens zu höheren Transferraten als die Bearbeitung der gleichen Aufgaben in umgekehrter Reihenfolge.

Diese Befunde widersprechen somit den Ergebnissen, die sich für die Bearbeitung von Induktionsaufgaben ergeben haben. Diese Widersprüchlichkeit der Befundmuster kann jedoch möglicherweise durch die Unterschiedlichkeit der Anforderungen in den beiden Aufgabenklassen erklärt werden: Während komplexe Induktionsaufgaben durch einen unüberschaubar großen Hypothesen- bzw. Problemraum gekennzeichnet sind, der eine Vielzahl in Frage kommender Hypothesen bzw. Operatoren beinhaltet, sind komplexe Transformationsaufgaben vor allem dadurch charakterisiert, dass die Anzahl anwendbarer Operatoren durch die Aufgabenstellung eingeschränkt ist. Dementsprechend sind komplexe Transformationsaufgaben selbst am Anfang einer Aufgabensequenz noch lösbar, auch wenn der Zeitbedarf zum Auffinden einer korrekten Operatorsequenz gegenüber einfachen Transformationsaufgaben erhöht ist. Komplexe Induktionsaufgaben sind oftmals – wie Sweller in verschiedenen Untersuchungen zeigen konnte – überhaupt nicht lösbar, wenn mit ihrer Bearbeitung

begonnen wird, da potenziell zu viele hypothetische Regeln für eine Lösung der Aufgabe in Frage kommen. Ein Wissenserwerb bei der Bearbeitung dieser Aufgaben findet somit nicht statt. Diese Aufgaben profitieren dementsprechend sehr stark von Lernprozessen, die durch die vorherige Bearbeitung einfacher Regelinduktionsaufgaben stattfinden können und die eine Einschränkung des Hypothesenraums bewirken. Bei Transformationssaufgaben wird dagegen durch die erfolgreiche Bearbeitung von komplexen Aufgaben bereits umfangreiches Wissen über erfolgreiche Lösungsstrategien erworben, welches auf die nachfolgenden – weniger komplexen – Aufgaben übertragen werden kann (vgl. *inclusiveness*). Nach dieser Erklärung spielt folglich die initiale Lösbarkeit der komplexen Aufgabe und die sich daraus ergebende Möglichkeit des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung eine entscheidende Rolle, wenn Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben entsprechend ihrer Komplexität vorhergesagt werden sollen (vgl. Abschnitt 1.4).

Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit. Während sich keinerlei Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung von Transformationsaufgaben entsprechend ihrer Komplexität zeigen, ergeben sich jedoch Effekte der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgaben in Form des bereits für Induktionsaufgaben angesprochenen Einstellungseffekts. Ein Einstellungseffekt (Luchins, 1942; Luchins & Luchins, 1959; Sweller & Gee, 1978) kann dann auftreten, wenn nach der Bearbeitung einer Menge von Aufgaben, die alle unter Anwendung der gleichen Regeln lösbar sind, Aufgaben gelöst werden sollen, für deren Lösung sinnvollerweise andere, üblicherweise weniger aufwändige Lösungsschritte eingesetzt werden sollten als bei den vorangegangenen Aufgaben. In diesem Fall kann das Vorliegen häufig geübter und damit für den Abruf aus dem Gedächtnis schnell zur Verfügung stehender Lösungsschritte den Abruf anderer, geeigneterer Lösungsstrategien erschweren und so zu Leistungseinbußen führen. "A set effect refers to a situation in which a problem solver becomes biased toward using a certain problem-solving operator when the operator is more available than other, more efficient operators" (Sternberg & Ben-Zeev, 2001, S. 154). Dieses Phänomen hat Luchins (1942; Luchins & Luchins, 1959; siehe auch Sweller & Gee, 1978) an so genannten Wasserrumfüllaufgaben eindrucksvoll demonstriert.

Luchins' Versuchspersonen hatten die Aufgabe sich vorzustellen, dass sie mit Hilfe von drei Gefäßen unterschiedlichen Volumens verschiedene Zielmengen einer Flüssigkeit abzufüllen hätten. Die Versuchspersonen erhielten zunächst Aufgaben,

die alle unter Anwendung der gleichen Regel lösbar waren: Um die Zielmenge zu erhalten, musste zunächst der Krug *B* gefüllt werden, aus diesem musste dann einmal die Füllmenge von Krug *A* und zweimal die Füllmenge von Krug *C* entnommen werden ($B-A-2C$). Wurden nach einer Abfolge von Aufgaben des $B-A-2C$ -Typs Aufgaben präsentiert, die sowohl mit dieser Regel als aber auch mit einer wesentlich einfacheren Regel zu lösen waren, zeigte sich, dass Versuchspersonen trotz der Verfügbarkeit dieser wesentlich einfacheren Lösungsalternative gegenüber einer Kontrollgruppe vermehrt auf die umständlichere $B-A-2C$ -Regel zurückgriffen. Beispielsweise wendeten 79% aller Versuchspersonen in den Experimenten von Luchins und Luchins (1959) die $B-A-2C$ -Regel auf Aufgaben an, die durch eine wesentlich einfachere, weniger Lösungsschritte enthaltende Prozedur ($A + C$) gelöst werden konnten. Zusätzlich zeigten Versuchspersonen, die zunächst mehrere $B-A-2C$ -Aufgaben bearbeitet hatten, Schwierigkeiten bei der Lösung von Kriteriumsaufgaben, auf die die $B-A-2C$ -Regel nicht angewendet werden konnte, d.h. bei diesen Aufgaben kam es zu Leistungseinbußen durch die vorherige wiederholte Bearbeitung strukturell unähnlicher Aufgaben. Die Kontrollgruppe konnte diese Aufgabe hingegen sofort lösen. Insgesamt waren diese Unterschiede der beiden Gruppen hinsichtlich der Performanz für die Kriteriumsaufgabe so stark ausgeprägt, dass sie einen Sequenzeffekt für die Gesamtperformanz (d.h. für alle betrachteten Aufgaben) bewirkten. Die Einführung von Aufgaben, die mit der $B-A-2C$ -Regel nicht lösbar waren, führte gleichzeitig zu einer Abschwächung des Einstellungseffekts bei der anschließenden erneuten Bearbeitung von $B-A-2C$ -Aufgaben. Diese Befunde konnten von Sweller und Gee (1978) repliziert werden. Der Einstellungseffekt konnte außerdem verhindert werden, wenn Versuchspersonen vor der Präsentation der $A+C$ -Aufgabe die Aufforderung bekamen: „Don't be blind!“ (Luchins & Luchins, 1959).

Die aus der Bearbeitung mehrerer ähnlicher Aufgaben sich ergebende „Mechanisierung des Problemlösens“ (Luchins, 1942) bewirkt nach diesen Ergebnissen eine Veränderung der Aufgabenschwierigkeit: „Wenn eine Einstellungsinduktion erfolgt ist, dann liegt die Schwierigkeit einer Aufgabe, auf die die einmal gelernte Methode nicht anzuwenden ist, höher, als wenn keine Einstellungsinduktion stattgefunden hat“ (Spies & Hesse, 1987, S. 389; vgl. Sweller 1980b). Die wiederholte Anwendung einer bestimmten Lösungsprozedur erschwert dann das Auffinden einer neuen Regel zur Lösung nachfolgender andersartiger Aufgaben und bewirkt so einen negativen Transfer. Ebenso kann die Aufgabenbearbeitung jedoch im Sinne eines positiven

Transfers auch erleichtert werden, wenn sich diese aufeinander folgenden Aufgaben bezüglich des Lösungswegs ähneln.

Erklärungen für die Entstehung des Einstellungseffekts. Für den Einstellungseffekt wurden Erklärungen aus verschiedenen theoretischen Schulen abgegeben. Aus einer gestaltpsychologischen Perspektive interpretierte Wertheimer (1945) den Einstellungseffekt als Folge eines rein mechanischen Lernens, bei dem erworbenes Wissen ohne Überprüfung seiner Eignung für eine Aufgabe „blind“ angewendet wird. Eine andere Interpretation basiert auf der Problemraumkonzeption von Newell und Simon (1972), nach der eine der im Problemraum verfügbaren Operatoresequenzen, nämlich die *B-A-2C*-Regel, so salient wird, dass im Verlauf der Einstellungsinduktion auf ein erneutes Absuchen des Problemraums nach anderen potenziellen Operatoresequenzen verzichtet wird. Diese Erklärung ähnelt dem bereits beschriebenen Ansatz des Hypothesentestens von Sweller (1980a, b; Sweller & Gee, 1978) bzw. von Levine (1975) zur Erklärung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Induktionsaufgaben, wobei Operatoren den hypothetischen Regeln entsprechen, die zur Lösung einer Transformations- oder Induktionsaufgabe eingesetzt werden können.

Weder der gestaltpsychologische noch der auf der Problemraumkonzeption aufbauende Erklärungsansatz enthalten jedoch präzise Annahmen bezüglich der zugrunde liegenden kognitiven Mechanismen. Dieser Nachteil kann durch eine Rekonzeptualisierung im Rahmen einer kognitiven Architektur zumindest teilweise ausgeräumt werden.

Zum Beispiel präzisieren Spies und Hesse (1987) mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT* (Anderson, 1983) die auf der Problemraumkonzeption aufbauende Erklärung des Einstellungseffekts. Hierzu verwenden die Autoren im Wesentlichen zwei architekturinhärente prozedurale Lernmechanismen, nämlich die Produktionskomposition sowie die Erhöhung des Stärkewertes von Produktionsregeln bei häufiger Anwendung. Danach basiert der Einstellungseffekt erstens darauf, dass die beteiligten Einzelproduktionen, die die einzelnen Umfüllschritte zur Lösung einer spezifischen Aufgabe widerspiegeln, zu einer Makroproduktion (Koedinger & Anderson, 1990) zusammengefügt werden, welche in ihrem Aktionsteil eine Sequenz von Einzelschritten spezifiziert, die bei Erfüllung des Bedingungsteils immer zusammen ausgeführt werden (Komposition). Mit Hilfe der Produktionssystemarchitektur können so die ein-

zelen Operatoren als Produktionsregeln repräsentiert werden, die durch die wiederholte sequentielle Ausführung zu einer Operatorsequenz bzw. zu einer Makrooperation zusammengefasst werden.

Zweitens kann die Salienz dieser Operatorsequenz im Problemraum durch den Stärkewert der Makrooperation repräsentiert werden. In ACT* wird angenommen, dass bei wiederholter Anwendung der Makrooperation einfachere, alternative Lösungsproduktionen nicht mehr greifen können, da der Stärkewert dieser Makroproduktion bei jedem wiederholten erfolgreichen Einsatz angehoben wird, so dass sie sich im Falle eines Konflikts zwischen zwei alternativen Produktionsregeln immer durchsetzt. Die beiden beschriebenen Mechanismen können damit die Tatsache erklären, dass auf den Einsatz einfacherer Methoden der Problemlösung zu Gunsten der eingeübten *B-A-2C*-Regel verzichtet wird. Führt der Einsatz der *B-A-2C*-Regel jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis, wird der Stärkewert der entsprechenden Makrooperation abgesenkt, und es erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für den Einsatz alternativer Lösungsproduktionen. In diesem Modell wird der Einstellungseffekt folglich als Resultat einer Interaktion der Generierung neuer symbolischer, prozeduraler Wissensstrukturen (Makroproduktionen) und der Veränderung der subsymbolischen Parameter dieser Produktionen (Stärkewerte) beschrieben.

Zusammenfassend lassen sich für Transformationsaufgaben Effekte der Anordnung der Aufgaben entsprechend ihrer strukturellen Ähnlichkeit sowie ihrer relativen Komplexität nachweisen. Im Hinblick auf die Rolle struktureller Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben zeigen sich in den Untersuchungen zum Einstellungseffekt negative Transfereffekte, die durch eine vorherige Bearbeitung von der Kriteriumsaufgabe strukturell unähnlichen Aufgaben hervorgerufen werden, sowie positive Effekte der wiederholten Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben. In Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität zeigen sich zwar größere positive Transfereffekte von der ersten zu einer zweiten Aufgabe, wenn mit der Bearbeitung der komplexeren Aufgabe begonnen wird. Diese gehen jedoch nicht mit einer Überlegenheit bezüglich der Gesamtperformanz im Vergleich zu einer invertierten Sequenz einher. Daher können für diese Aufgabenklasse keine Sequenzeffekte nachgewiesen werden.

Auch für Transformationsaufgaben enthalten die Erklärungen zur Entstehung von Sequenzeffekten (im Sinne des Einstellungseffekts) kaum explizite Annahmen darüber, inwieweit automatisch einsetzende oder deliberative Prozesse als Ursache

verantwortlich gemacht werden können. Allerdings werden – ähnlich wie bei der Erklärung von Sequenzeffekten bei Induktionsaufgaben – viele Konzepte herangezogen, die besser mit automatisch einsetzenden Prozessen in Verbindung gebracht werden können, wie sich auch bei der Anwendung der kognitiven Architektur ACT* (Anderson, 1983) zur Erklärung des Einstellungseffekts zeigt (Spies & Hesse, 1987). Hierzu gehört vor allem die Veränderung der Salienz von Operatoren bzw. Operatorsequenzen, die als automatische Veränderung des Stärkewerts prozeduralen Wissens durch dessen Anwendung interpretiert werden kann. Schließlich wird beim Einstellungseffekt von einer Mechanisierung des Problemlösens gesprochen, die unter anderem dadurch aufgehoben werden kann, dass Versuchspersonen durch entsprechende instruktionale Hinweise („Don't be blind!“) zu einer bewussteren Aufgabebearbeitung angeregt werden. Diese Instruktion könnte folglich eine Unterbrechung der automatischen Verarbeitung bewirken und eine deliberative Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Aufgabenmerkmale anstoßen (vgl. Sweller & Gee, 1978).

Die Befunde von Reed und Mitarbeitern (1974) deuten allerdings darauf hin, dass auf Transferprozessen aufbauende Sequenzeffekte bei Transformationsaufgaben möglicherweise nicht ausschließlich über automatische Prozesse erklärt werden können. In dieser Studie fand sich ein positiver Transfer auf eine nachfolgende Aufgabe in Abhängigkeit von der Bearbeitungssequenz nur dann, wenn Versuchspersonen zuvor über die strukturellen Entsprechungen zwischen den beiden Aufgaben aufgeklärt worden waren und ihnen somit eine bewusste Nutzung dieser Entsprechungen für die Bearbeitung der zweiten Aufgabe möglich war. Transfereffekte, die eine Grundlage für die Entstehung von Sequenzeffekten bilden, stellen sich demnach bei Transformationsaufgaben nicht immer automatisch ein, sondern bedürfen manchmal deliberativer Prozesse, um strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben zu erkennen und zu nutzen. Diese Prozesse spielen jedoch bei voraussetzungsreichen Aufgaben eine noch weit wichtigere Rolle, so dass dort ausführlich auf die Bedeutsamkeit der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeit für Transferprozesse eingegangen werden wird.

1.4 Rahmenkonzeption: Sequenzeffekte als Folge von Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und von Wissenstransfer

Zusammenfassend lassen sich für voraussetzungsarme Aufgaben in den drei betrachteten Aufgabenklassen Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität sowie nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit nachweisen.

Empirische Befunde, die für eine Anordnung der Aufgaben nach zunehmender Komplexität sprechen, ergeben sich allerdings ausschließlich bei der Bearbeitung von Induktionsaufgaben, während für die Bearbeitung von Reiz-Reaktions-Aufgaben keine entsprechenden Untersuchungen vorliegen. Bei der Bearbeitung von Transformationsaufgaben konnten keine Sequenzeffekte im Hinblick auf die Gesamtbearbeitungsleistung in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer Komplexität nachgewiesen werden.

Die strukturelle Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben erweist sich dagegen für alle drei Aufgabenklassen als bedeutsames Merkmal für die Entstehung von Sequenzeffekten. Eine Anordnung der Aufgaben nach struktureller Ähnlichkeit erweist sich insbesondere aus der Perspektive des Taskshift-Paradigmas als leistungsförderlich, bei dem die Leistung bei der Bearbeitung strukturell geblockter Sequenzen mit der Bearbeitungsleistung bei alternierenden Aufgabensequenzen verglichen wird. Besteht die wesentliche Anforderung bei der Bearbeitung einer Aufgabe darin, zunächst die anzuwendende Regel zu identifizieren, wie es bei Induktions- und Transformationsaufgaben der Fall ist, dann kann die wiederholte Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben die anschließende Bearbeitung einer strukturell unähnlichen Aufgabe erschweren. Dieser als Einstellungseffekt in die Literatur eingegangene Sequenzeffekt ergibt sich daraus, dass das Erkennen der Regel für die strukturell unähnliche Aufgabe durch die vorangegangene Einübung einer anderen Regel erschwert wird.

Vergleicht man die verschiedenen Erklärungsansätze für Sequenzeffekte, die innerhalb der einzelnen Aufgabenklassen bestehen, dann resultieren Sequenzeffekte einerseits aus einem *Lernprozess bei der Aufgabenbearbeitung* und andererseits aus einem Prozess des *Transfers* der modifizierten Wissensstrukturen auf nachfolgende Aufgaben (Abbildung 1). Unterschiede hinsichtlich der Gesamtleistung zwischen ver-

schiedenen Bearbeitungssequenzen sollten sich dann ergeben, wenn eine Bearbeitungssequenz im Vergleich zu einer anderen Sequenz (1) Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung in besonderer Weise fördert und/oder (2) wenn sie so beschaffen ist, dass ein Wissenstransfer zwischen benachbarten Aufgaben besonders gut möglich ist. Es wird im Folgenden basierend auf den Befunden zur Bearbeitung von Induktionsaufgaben die Auffassung vertreten, dass Aufgabensequenzen, in denen die zu bearbeitenden Aufgaben nach zunehmender Komplexität angeordnet sind, insbesondere den Prozess des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung unterstützen. Aufgabensequenzen, bei denen strukturell ähnliche Aufgaben aufeinander folgen, sollten dagegen vor allem einen Wissenstransfer zwischen diesen Aufgaben ermöglichen.

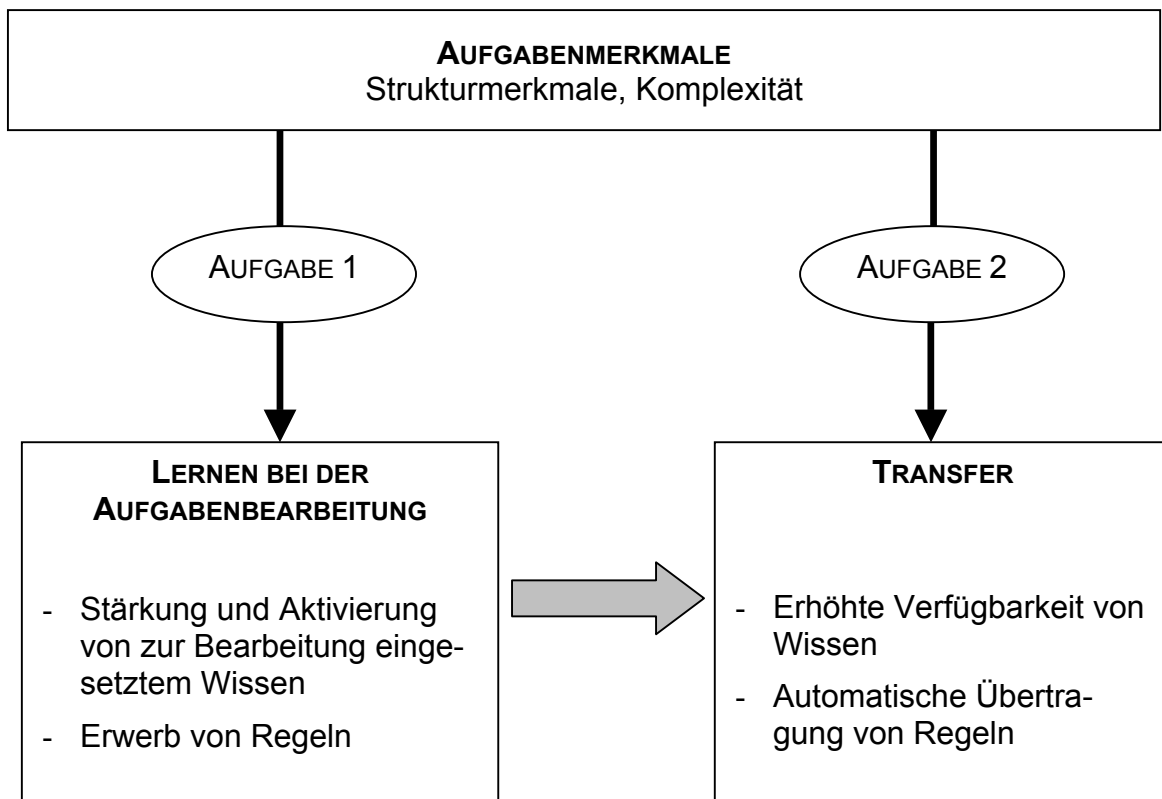


Abbildung 1: Rahmenkonzeption zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben

Für voraussetzungsarme Aufgaben scheint der Lernprozess vor allem darin zu bestehen, dass Wissens Elemente, die zur Bearbeitung einer Aufgabe benötigt wurden, zusätzlich gestärkt bzw. aktiviert werden. In der Folge weisen sie gegenüber ande-

ren, nicht benötigten Wissens-elementen eine höhere Zugänglichkeit im Gedächtnis auf. Diese Annahme findet sich im Taskshift-Paradigma wieder, in dem Wechselkosten bei der Bearbeitung alternierender Aufgabenlisten entweder durch die Annahme eines passiven Nachwirkens zuvor benötigter kognitiver Inhalte und daraus resultierender Interferenz (Allport et al., 1994) oder durch die Notwendigkeit zur aktiven Umkonfiguration des kognitiven Systems z.B. über gezielte Inhibitionsprozesse (Li et al., 2000; Mayr & Keele, 2000; Miyake et al., 2000; Rogers & Monsell, 1995) erklärt werden. Auch für Induktions- und Transformationsaufgaben besteht eine wesentliche Annahme darin, dass die Bearbeitung einer Aufgabe die Salienz der für die Bearbeitung dieser Aufgabe benötigten Regeln gegenüber anderen Regeln in einem hypothetischen Suchraum erhöht (Spies & Hesse, 1987; Sweller, 1980a, b; Sweller & Gee, 1978). Zieht man eine kognitive Architektur wie ACT* (Anderson, 1983) zur Präzisierung dieser Annahme hinzu (Spies & Hesse, 1987), so entspricht dieser erhöhten Zugänglichkeit von Regeln im Gedächtnis vor allem ein Anstieg der Produktionsstärke, welche in ACT* die Abrufbarkeit von Fertigkeiten aus dem Gedächtnis bestimmt. Zusätzlich wird für die Erklärung des Einstellungseffekts auch die Bildung komplexer prozeduraler Wissensstrukturen wie z.B. Makrooperatoren postuliert. Zusammenfassend ergeben sich folglich Veränderungen des kognitiven Systems durch die Aufgabenbearbeitung im Wesentlichen im Hinblick auf die (relative) Aktiviertheit und Abrufbarkeit des benötigten Wissens und in geringerem Ausmaß auch im Hinblick auf die Bildung neuer prozeduraler Wissensstrukturen (Regeln).

Die durch Lernen bei der Aufgabenbearbeitung veränderten kognitiven Strukturen stehen dann zur Verfügung, um bei der Bearbeitung nachfolgender Aufgaben im Sinne eines Wissenstransfers eingesetzt zu werden. Mit Ausnahme der Ergebnisse von Reed und Mitarbeitern (1974) gibt es keine Befunde, die darauf hinweisen, dass der Transferprozess bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben einer deliberativen Steuerung bedarf. Vielmehr erscheint die Wissensnutzung automatisch auf Grund der Voraktivierung von für die Aufgabenbearbeitung (geeigneten) kognitiven Elementen zu erfolgen. Dies entspricht der Konzeption des so genannten *low road* Transfers von Salomon und Perkins (1989), der durch eine automatische Übertragung vorhandener Fertigkeiten und Kenntnisse auf eine neue Situation gekennzeichnet ist, die ohne bewusste Anstrengung und ohne eine gezielte Aufmerksamkeitsausrichtung auf den Transferprozess verläuft. Diese Art des Transfers hängt davon ab,

wie oft die in Frage stehende kognitive Aktivität ausgeführt/geübt wurde und damit den oben angesprochenen Lernprozessen ausgesetzt war.

Im nächsten Kapitel soll geprüft werden, ob diese Rahmenkonzeption, in der Sequenzeffekte auf Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und auf Transferprozesse zurück geführt werden, auch für die Beschreibung, Erklärung und Vorhersage von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben geeignet ist. Hierzu werden zunächst empirische Befunde für diese Art von Aufgaben präsentiert und anschließend wird eine Übertragung der Rahmenkonzeption auf voraussetzungsreiche Aufgaben vorgenommen – unter Berücksichtigung der Unterschiede, die diese Aufgaben zu den bisher behandelten voraussetzungsarmen Aufgaben aufweisen. Diese Unterschiede bedingen, dass das Entstehen von Sequenzeffekten für voraussetzungsreiche Aufgaben nicht ausschließlich durch aktivationsbasierte Lernprozesse sowie automatische Transferprozesse erklärt werden kann. Stattdessen müssen zusätzliche Prozesse angenommen werden, die sich darauf beziehen, dass einerseits Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben vor allem in der Konstruktion neuer symbolischer Wissensstrukturen besteht und dass andererseits ein Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben vom Erkennen potenzieller struktureller Ähnlichkeiten der Aufgaben abhängt. Insbesondere dieser letzte Aspekt trägt dazu bei, dass Sequenzeffekte für voraussetzungsreiche Aufgaben nur unter bestimmten Bedingungen zu erwarten sind.

2. Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

Sämtliche der bisher beschriebenen Aufgabenklassen sind dadurch gekennzeichnet, dass nur in geringem Ausmaß Wissen für die Bewältigung entsprechender Aufgaben vorausgesetzt wird (*knowledge-lean problems* nach VanLehn, 1989). In der Regel sind für diese Aufgaben alle benötigten Informationen in der Instruktion für die Aufgabe vorgegeben. Im Gegensatz dazu erfordert die erfolgreiche Bearbeitung so genannter voraussetzungsreicher Aufgaben (*knowledge-rich problems* nach VanLehn, 1989) spezifische Fertigkeiten und Kenntnisse, die oft auch Gegenstand gezielter Vermittlungsversuche sind. Das domänenspezifische Vorwissen eines Problemlösers beeinflusst vor allem, wie eine Aufgabe mental repräsentiert wird und welche Operatoren für eine Aufgabenbearbeitung zur Verfügung stehen. Die Variabilität bei der Aufgabenbearbeitung ist demnach wesentlich höher, so dass sich die Möglichkeit ergibt, neben den zentralen Leistungsparametern wie der Schnelligkeit und Akkuratheit, mit der die richtige Reaktion bestimmt wird, auch die Aufgabenrepräsentationen und Bearbeitungsstrategien zu analysieren, die zum Generieren einer Reaktion geführt haben. Typische voraussetzungsreiche Aufgaben, die in experimentellen Untersuchungen zum Einsatz kommen, stammen aus Domänen wie Computerprogrammierung, Physik oder Mathematik. Viele dieser Aufgaben sind zusätzlich dadurch gekennzeichnet, dass sie eine reichhaltige semantische Einbettung aufweisen (z.B. Textaufgaben in der Mathematik), die für die eigentliche Bearbeitung der Aufgaben irrelevant ist, diese jedoch nichtsdestotrotz in vielfältiger Weise beeinflussen kann.

Für die Existenz von Sequenzeffekten bei voraussetzungsreichen Aufgaben liegen nur wenige empirische Befunde vor, die in Abschnitt 2.1 beschrieben werden. In Abschnitt 2.2 wird anschließend erörtert, wie die zwischen voraussetzungsarmen und voraussetzungsreichen Aufgaben bestehenden Unterschiede die für Sequenzeffekte aufgestellte Rahmenkonzeption beeinflussen. Insbesondere wird spezifiziert, welche Veränderungen und Ergänzungen bezüglich der verursachenden Prozesse – Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und Wissenstransfer – vorgenommen werden müssen, um den Besonderheiten voraussetzungsreicher Aufgaben gerecht zu werden.

2.1 Empirische Befunde zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben sind bislang kaum systematisch untersucht worden. Die wenigen hierzu vorliegenden Befunde werden im Verhältnis zu den Ergebnissen in den anderen Aufgabenklassen relativ ausführlich dargestellt, da sie den Ausgangspunkt für die späteren eigenen Untersuchungen bilden.

Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität. Insbesondere für voraussetzungsreiche Aufgaben ist zu erwarten, dass sich Bearbeitungssequenzen, in denen die Aufgaben entweder nach zunehmender oder nach abnehmender Komplexität angeordnet sind, bezüglich der resultierenden Leistung unterscheiden. Werden zunächst einfache und erst im Anschluss komplexere Aufgaben eines Aufgabentyps bearbeitet, kann die Bearbeitung einer relativ einfachen Aufgabe dazu führen, dass ein Teil der für die Bearbeitung der komplexen Aufgabe später benötigten Lösungselemente bereits erworben wird. Ohne dieses bereits erworbene Wissen wäre die komplexe Aufgabe möglicherweise unlösbar. In diesem Sinne postulieren viele Instruktionspsychologen die Anordnung von *Lernmaterialien* nach zunehmender Komplexität um zu gewährleisten, dass zunächst einfache Bestandteile eines Lehrstoffes verstanden werden und dass dieses Wissen dann bei zunehmend komplexeren Anforderungen genutzt werden kann (Collins, Brown & Newman, 1989; Gagné, 1962, 1965; Gagné & Paradise, 1961; van Merriënboer, 1997, van Merriënboer, Clark & de Croock, 2002; Silbert, Carnine & Stein, 1981).

Die Ergebnisse einer Studie von Reed und Mitarbeitern (Reed et al., 1994) mit voraussetzungsreichen Aufgaben stützen diese Annahme jedoch nicht. In dieser Studie sollten die Versuchspersonen im Anschluss an eine beispielbasierte Lernphase mehrere Algebraaufgaben lösen, die entweder in ihrer Komplexität aufsteigend oder absteigend angeordnet waren. Während der Problemlösephase konnten sie auf die instruktionellen Beispiele der Lernphase zurückgreifen. Die Ergebnisse zeigten keine Unterschiede in der Rückgriffshäufigkeit in Abhängigkeit von der vorgegebenen Aufgabensequenz – entgegen der scheinbar implizit vorhandenen Annahme der Autoren, dass es sich bei der hinsichtlich der Komplexität abnehmenden Aufgabensequenz um eine schwieriger zu bewältigende Anforderung handeln würde: "We were somewhat surprised that the complex-to-simple order did not increase the use of e-

xamples in relation to the simple-to-complex order" (Reed et al., 1994, S. 384). Auch bezogen auf die Problemlöseperformanz ergaben sich in dieser Studie keine Unterschiede zwischen den Aufgabensequenzen¹.

Eine Untersuchung, in der Effekten von Bearbeitungssequenzen bei der Bearbeitung mathematischer Textaufgaben aus der Algebra systematisch nachgegangen wurde, bildet die Arbeit von Zollman (1987). Zollmans Untersuchung basiert auf der Frage, wie sich Aufgabensequenzen, bei denen die Aufgaben entweder entsprechend ihrer Komplexität aufsteigend oder absteigend angeordnet sind, in ihren Transferraten unterscheiden. Er verwendete fünf verschiedene Arten von Aufgaben zur Manipulation der Aufgabenkomplexität (vgl. Tabelle 1), wobei eine Basisaufgabe (*Ba*) den Ausgangspunkt für die Konstruktion der vier komplexeren, jeweils bezüglich einer Aufgabeneigenschaft variierten Aufgaben bildete. In Aufgabe *V* wurde die Anzahl der Variablen (*variables*) gegenüber der Basisaufgabe erhöht, in Aufgabe *C* wurde eine zusätzliche bei der Lösung zu berücksichtigende Bedingung (*condition*) eingeführt, in Aufgabe *S* wurde die Größe des Lösungsraums (*solution space*) durch eine Erhöhung der numerischen Variablenwerte erhöht, und in Aufgabe *E* wurde schließlich die semantische Einbettung (*embodiment*) gegenüber der Basisaufgabe modifiziert.

¹ Die Daten für die entsprechenden Analysen wurden der Autorin von Stephen K. Reed zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Testaufgaben nach Zollman (1987)

Basisproblem Ba:	<i>Sam has \$1.65 in nickels and quarters. He has 9 coins in all. How many coins of each kind does Sam have?</i>
Problem V:	<i>Sam has \$.65 in nickels, dimes and quarters. He has 6 coins in all. How many coins of each kind does Sam have?</i>
Problem C:	<i>Sam has \$1.25 in nickels and quarters. He has 9 coins in all. If he had twice as many nickels and three times as many quarters, he would have 22 coins. How many coins of each kind does Sam have?</i>
Problem S:	<i>Sam has \$2.35 in nickels and quarters. He has 19 coins in all. How many coins of each kind does Sam have?</i>
Problem E:	<i>Mr. Smith has 165 pounds of candy in five-pound boxes and in twenty-five pound boxes in his store. He has 9 boxes in all. How many boxes of each size does Mr. Smith have?</i>

Bei den Versuchspersonen handelte es sich um 94 Schüler mehrerer fünfter Schulklassen in den USA. Diese mussten jeweils zwei der Aufgaben eigenständig bearbeiten, wobei die Aufgabensequenz interindividuell variiert wurde. In den hinsichtlich der Komplexität zunehmenden Aufgabensequenzen wurde jeweils zuerst die Basisaufgabe dargeboten, und im Anschluss musste eine der vier komplexeren Aufgaben gelöst werden. In den inversen Sequenzen wurde zunächst eine der komplexen Aufgaben vorgegeben, anschließend wurde dann die Basisaufgabe bearbeitet. Als abhängige Variable wurde unter anderem die Korrektheit der Antworten in Prozent verwendet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Korrekte Antworten in Prozent in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität und der Aufgabensequenz

	Aufgabensequenz mit zunehmender Komplexität	Aufgabensequenz mit abnehmender Komplexität	Differenz B
Basisaufgabe (geringe Komplexität)	70 %	58 %	-12 %
Aufgaben V, C, S und E (hohe Komplexität)	46 %	27 %	-19 %
Differenz A	-24%	-31%	-

Wie sich zeigte, waren die Lösungsraten bei Aufgaben hoher Komplexität deutlich niedriger ausgeprägt als die der Basisaufgabe – ein Ergebnis, welches für eine gelungene Manipulation der Aufgabenkomplexität spricht (vgl. Differenz A). Die Vorteile einer hinsichtlich der Komplexität zunehmenden Aufgabensequenz ergaben sich sowohl bei der Bearbeitung der Basisaufgabe als auch bei der Bearbeitung der komplexeren Aufgaben (vgl. Differenz B). Zollman (1987) berichtet den prozentualen Gewinn (bzw. Verlust) bei der Aufgabenbearbeitung, der durch die Positionierung einer Aufgabe an zweiter Stelle erreicht wird – gegenüber der Bearbeitung einer Aufgabe an erster Stelle. Diese Differenz drückt damit das Ausmaß an Transfer aus, der von der ersten Aufgabe auf die zweite Aufgabe stattfindet. Demnach kam es bei der Bearbeitung der komplexen Aufgaben im Anschluss an die Basisaufgabe zu einer Leistungssteigerung um 19% – verglichen mit der Leistung, die bei der Bearbeitung dieser Aufgaben vor der einfacheren Basisaufgabe erreicht wurde (27% korrekte Antworten). Zollman (1987) berichtet für diese Differenz einen p-Wert von 0.062, wobei er die Art der verwendeten Teststatistik unerwähnt lässt. Bei der Bearbeitung der Basisaufgabe an zweiter Stelle kam es zu einer Abnahme der Leistung um 12% – wiederum verglichen mit der Leistung, die bei der Bearbeitung dieser Aufgabe an erster Stelle erreicht wurde (70% korrekte Antworten).

Diese Ergebnisse liefern zumindest erste Hinweise, dass Problemlöser bei der Bearbeitung relativ komplexer Aufgaben von der vorherigen Bearbeitung strukturähnlicher, aber weniger komplexer Aufgaben profitieren – im Vergleich zu einer Situation, bei der sie mit der Bearbeitung der komplexen Aufgaben beginnen.

Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit. Auch für Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit liegen nur vereinzelte empirische Nachweise vor.

Loftus und Suppes (1972) untersuchten die Leistung von Schülern der sechsten Klasse bei der Bearbeitung einfacher algebraischer Textaufgaben. In einer linearen Regressionsanalyse erwies sich die Reihenfolge, in der die Aufgaben bearbeitet wurden, als bester Prädiktor für die Problemlöseleistung. Demnach wurden insbesondere solche Aufgaben fehlerhaft bearbeitet, bei denen andere Operatoren angewendet werden mussten als bei der vorangegangenen Aufgabe. Strukturelle Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben war für den Problemlöseerfolg bedeutsamer als beispielsweise die Anzahl durchzuführender mathematischer Operationen, die Komplexität der semantischen Einbettung oder auch als die Notwendigkeit, Einheiten verschiedener Variablen ineinander zu konvertieren. „Whether students are bright or dull, they are more likely to solve a problem correctly if it is similar to the problem that preceded it“ (Loftus & Suppes, 1972, S. 541). Ähnliche Sequenzeffekte beim Problemlösen konnten auch bei der Bearbeitung arithmetischer Aufgaben (Suppes, Jerman & Brian, 1968; Suppes, Loftus & Jerman, 1969) gezeigt werden.

Keine Hinweise auf Sequenzeffekte liefert dagegen eine Untersuchung von Pirolli und Recker (1994) zum Erwerb von Programmierfertigkeiten mit Hilfe des LISP-Tutors (*List Processing*). Hier mussten voraussetzungsreiche Aufgaben im Anschluss an eine Lernphase in verschiedenen Reihenfolgen bearbeitet werden. Die Aufgabensequenzen wurden dabei so gewählt, dass damit eine Überprüfung der aus der von Singley und Anderson (1989) entworfenen Transfertheorie zum Fertigkeitserwerb abgeleiteten Hypothesen möglich war (vgl. Abschnitt 3.1.2). Insbesondere sollte nachgewiesen werden, dass anhand der präsentierten Lernbeispiele sowie anhand der Art und Anzahl bereits gelöster Testaufgaben die Leistung bei einer spezifischen Aufgabe vorhergesagt werden kann. Um diesen Nachweis zu erbringen, wurde eine Produktionssystemanalyse eingesetzt, mit deren Hilfe das Ausmaß des Transfers von Lernbeispielen auf später zu bearbeitende Aufgaben sowie das Ausmaß des Transfers zwischen Aufgaben vorhergesagt wurde.

Die Versuchspersonen erhielten zunächst eine sechsstündige LISP-Einführung, in der ihnen unter anderem die Zieldomäne, das Programmieren rekursiver Funktionen, anhand von zwei verschiedenen Arten von Beispielen erläutert wurde. Versuchspersonen in der einen Bedingung erhielten Beispiele von LISP-Funktionen, die mit nu-

merischem Input arbeiten, während in der anderen Bedingung Funktionen mit Listen als Input präsentiert wurden. Im Anschluss mussten zehn Aufgaben zum Programmieren rekursiver Funktionen eigenständig bearbeitet werden: Vier Aufgaben mit numerischem Input (N1 - N4), vier Aufgaben mit Listen als Input (L1 - L4) sowie zwei Aufgaben mit gemischtem Input (M1, M2). Die Aufgaben wurden in zwei unterschiedlichen Sequenzen dargeboten. In der geblockten Sequenz wurden zunächst die Aufgaben mit numerischen Input, dann die Aufgaben mit Listen-Input und zuletzt die beiden gemischten Aufgaben dargeboten, während sich in der alternierenden Sequenz Aufgaben mit numerischen und mit Listen-Input abwechselten. Auch in dieser alternierenden Sequenz folgten die gemischten Aufgaben am Ende der Sequenz.

Eine Analyse der Leistung bei der Bearbeitung der Aufgaben zeigte eine Beschleunigung der Aufgabenbearbeitung mit zunehmender Anzahl bearbeiteter Aufgaben (Übungseffekt), der für die gemischte Sequenz stärker ausgeprägt war als für die geblockte Aufgabenabfolge. Der für die vorliegende Fragestellung entscheidende Befund war hingegen nicht nachweisbar – die beiden Bearbeitungssequenzen unterschieden sich nicht hinsichtlich der Gesamtbearbeitungsleistung, d.h. es konnten keine Sequenzeffekte beobachtet werden, wenn Aufgaben entweder nach struktureller Ähnlichkeit geblockt oder alternierend bearbeitet wurden.

Zusammenfassend finden sich für voraussetzungsreiche Aufgaben nur wenige Hinweise auf die Existenz von Sequenzeffekten in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität (Zollman, 1987) sowie nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit (Loftus & Suppes, 1972; Suppes et al., 1968; Suppes et al., 1969). Dies liegt einerseits sicherlich daran, dass bislang nur wenige systematische Studien mit der entsprechenden Fragestellung durchgeführt wurden, ist aber auch andererseits möglicherweise in dem Phänomen und der Art der untersuchten Aufgaben selbst begründet. Im Folgenden wird die Auffassung vertreten, dass voraussetzungsreiche Aufgaben im Vergleich zu voraussetzungsarmen Aufgaben spezifische Eigenschaften aufweisen, die dazu führen, dass Sequenzeffekte für diese Aufgaben nur unter bestimmten Bedingungen auftreten und damit schwerer nachweisbar sind. Im nächsten Abschnitt soll dargestellt werden, welche Konsequenzen sich für den Prozess des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung als auch für den Prozess des Wissenstransfers ergeben, wenn voraussetzungsreiche anstelle voraussetzungsarmer Aufgaben bearbeitet werden und wie diese sich auf die Entstehung von Sequenzeffekten auswirken.

2.2 Lernen und Wissenstransfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

In Abschnitt 1.4 wurde eine allgemeine Rahmenkonzeption zur Erklärung von Sequenzeffekten beschrieben, welche auf der Annahme von zwei distinkten Prozessen, nämlich Lernen bei der Aufgabenbearbeitung sowie Transfer, beruht. Aufbauend auf einer Literaturübersicht für Sequenzeffekte bei voraussetzungsarmen Aufgaben wurde abgeleitet, dass Lernen bei der Aufgabenbearbeitung im Wesentlichen in einer Veränderung der Aktiviertheit lösungsrelevanter Wissens Elemente und zu einem geringeren Anteil auch in der Bildung neuen Regel- oder Operatorwissens besteht. Der Transfer auf nachfolgende Aufgaben erfolgt weitestgehend automatisch, d.h. wenn entsprechendes Wissen erworben wurde, kann davon ausgegangen werden, dass dieses sich auf die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben (positiv oder negativ) auswirkt.

Für voraussetzungsreiche Aufgaben wird nicht angenommen, dass Sequenzeffekte für diese Aufgaben überwiegend auf aktivationsbasierten Lernprozessen sowie automatischen Transferprozessen beruhen. Voraussetzungsreiche Aufgaben unterscheiden sich in mindestens zwei Eigenschaften von voraussetzungsarmen Aufgaben, und diese Unterschiede haben bedeutsame Konsequenzen in Bezug auf die beiden für Sequenzeffekte verantwortlich gemachten Prozesse.

Erstens beinhalten voraussetzungsreiche Aufgaben oftmals eine sehr umfangreiche semantische Einbettung der eigentlichen lösungsrelevanten Information, während voraussetzungsarme Aufgaben meistens auf wenige, lösungsrelevante Reizdimensionen beschränkt sind. Voraussetzungsreiche Aufgaben zeichnen sich demzufolge durch eine bestimmte Konfiguration von Strukturmerkmalen und Oberflächenmerkmalen aus. Während eine Modifikation der Strukturmerkmale einer Aufgabe automatisch die Notwendigkeit einer Veränderung des Lösungswegs mit sich bringt, sind die Oberflächenmerkmale – wie die semantische Einbettung einer Aufgabe in einen bestimmten Kontext – für die Lösung dieser Aufgabe bedeutungslos (vgl. Gick & Holyoak, 1983; Ross, 1985, 1987; Ross & Kilbane, 1997). "Surface or superficial features are those aspects of a problem that, when changed, do not affect the solution procedure; that is, they have no necessary relevance to the solution to the problem" (Catrambone, 1998, S. 355). Eine wesentliche Anforderung an den Problemlöser besteht darin zu erkennen, welche Aufgabenmerkmale irrelevant für die Lösung

sind und welche Merkmale eine kausale Bedeutung für die Auswahl einer geeigneten Lösungsprozedur haben. Um diese Unterscheidung machen zu können, benötigen Problemlöser domänenspezifisches Vorwissen, welches das zweite Abgrenzungsmerkmal zu voraussetzungsarmen Aufgaben darstellt.

Voraussetzungsreiche Aufgaben sind per definitionem dadurch gekennzeichnet, dass Problemlöser zu ihrer Lösung in hohem Ausmaß auf (zuvor vermitteltes) domänenspezifisches Wissen zurückgreifen müssen. Dieses Vorwissen wird zunächst benötigt, um eine Aufgabenstellung zu verstehen, d.h. sie angemessen anhand ihrer Strukturmerkmale mental zu repräsentieren (Cummins, Kintsch, Reusser & Weimer, 1988; Kintsch, 1998; Kintsch & Greeno, 1985; Nathan, Kintsch & Young, 1992; Reusser, 1994; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992). Voraussetzungsarme Aufgaben machen dagegen eine Aufgabeninterpretation nur in geringem Ausmaß erforderlich, da die Aufgabenanforderungen in den meisten Fällen bereits eindeutig spezifiziert sind. Zusätzlich müssen für die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben Kenntnisse über Lösungsprozeduren vorhanden sein, die auf die mentale Repräsentation der Aufgabenstellung angewendet werden können.

In Abhängigkeit von dem Ausmaß, in dem ein Problemlöser bereits über Erfahrungen in einer Domäne verfügt, kann Vorwissen in verschiedenen Formen vorliegen, nämlich einerseits als so genanntes Fallwissen oder in Form von Aufgabenschemata (Faries & Reiser, 1988). Welche Wissensform vorhanden ist, hat entscheidende Auswirkungen auf die Art, wie eine Aufgabe bearbeitet wird und damit auch seinerseits wiederum auf das Wissen, welches durch die Aufgabenbearbeitung erworben wird.

Bei *Fallwissen* handelt es sich um konkrete Repräsentationen einzelner Problemlöseerfahrungen (Strube & Janetzko, 1990). Der Erwerb konkreter, deklarativer Repräsentationen von Aufgaben und ihren Lösungen kann im Wesentlichen über zwei Wege erfolgen (Reimann & Schult, 1996; Zhu & Simon, 1987). Erstens kann Fallwissen daraus resultieren, dass Aufgaben eigenständig erfolgreich bearbeitet wurden und daher die Aufgabenstellung sowie deren Lösung bekannt sind (*learning by doing*, Anzai & Simon, 1979; Sweller & Cooper, 1985; Zhu & Simon, 1987). Konkretes Fallwissen kann sich zweitens durch die Verarbeitung von Beispielaufgaben mit vorgegebenen Lösungen (so genannter *worked-out examples* oder ausgearbeiteter Lösungsbeispiele) ergeben (Anderson & Fincham, 1994; Anderson, Fincham & Douglass, 1997; Atkinson, Derry, Renkl & Wortham, 2000; LeFevre & Dixon, 1986;

Pirolli & Anderson, 1985; Reimann, 1997; Reimann & Schult, 1996; Quilici & Mayer, 1996). Entscheidend für Fallwissen ist, dass es nicht nur in einer Repräsentation der Strukturmerkmale von Aufgaben besteht, sondern dass es auch Repräsentationen lösungsirrelevanter Oberflächenmerkmale enthält. Fallwissen wird als Vorstufe beim Fertigkeitserwerb angesehen, der sich von zunächst konkreten Repräsentationen zu zunehmend abstrakten Wissensstrukturen vollzieht (Anderson et al., 1997; VanLehn, 1989, 1996).

In Einklang mit diesen Vorstellungen zum Fertigkeitserwerb wird das Vorhandensein von Vorwissen in Form von *Aufgabenschemata* oftmals als kennzeichnendes Merkmal von Expertise heraus gestellt (Cummins, 1992; Reimann & Chi, 1989; VanLehn, 1989). Bei Aufgabenschemata handelt es sich um abstrakte Wissensstrukturen zur Repräsentation von Wissen über Aufgabenkategorien, von denen im Allgemeinen angenommen wird, dass sie sich aus zwei Komponenten zusammensetzen (Blessing & Ross, 1996; VanLehn, 1989): Neben dem Wissen über die konstituierenden Strukturmerkmale einer Aufgabenkategorie beinhalten Schemata auch eine Repräsentation der Lösungsprozedur, die eine erfolgreiche Bearbeitung von Aufgaben, die in diese Kategorie fallen, gewährleistet (*procedural* oder *calculational attachment*, vgl. Derry, 1989; Marshall, 1995; Mayer, 1981; Michener, 1978; Schoenfeld, 1985; Sweller, 1994; VanLehn, 1989, 1996). "A *problem schema* consists of information about the class of problems the schema applies to and information about their solutions. Problem schemas have two main parts: one for describing problems and one for describing solutions" (VanLehn, 1989, S. 545f.). Werden wiederholt Aufgaben auf der Basis eines solchen Aufgabenschemas bearbeitet, so wird dieses Schema zunehmend automatisiert (Sweller et al., 1998).

Schemata sind Folge eines Abstraktionsprozesses, bei dem über oberflächliche Unterschiede verschiedener Aufgaben hinweg eine strukturmerkmalsbasierte Repräsentation aufgebaut wird (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; vgl. Abschnitt 2.2.1).

Je nachdem, ob ein Problemlöser eher über Fallwissen oder aber über Aufgabenschemata für eine Domäne verfügt, stehen ihm unterschiedliche Methoden zur Aufgabenbearbeitung zur Verfügung, deren Anwendung wiederum mit bestimmt, welches Wissen erworben wird. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt beschrieben, wie voraussetzungsreiche Aufgaben entweder schemabasiert oder aber durch analoges Problemlösen auf der Basis von Fallwissen gelöst werden können

und welche Konsequenzen sich daraus für Lernen bei der Aufgabenbearbeitung – als eine wesentliche Teilkomponente für die Entstehung von Sequenzeffekten – ergeben.

2.2.1 Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben als Folge schemabasierter oder analoger Problemlöseprozesse

Die im Folgenden beschriebenen Annahmen zu schemabasierten Problemlösemethoden einerseits und zum analogen Problemlösen andererseits sollen anhand eines Aufgabenbeispiels aus den später zu berichtenden eigenen Untersuchungen verdeutlicht werden. Eine dort verwendete Aufgabe aus dem Bereich der Algebra (ein so genanntes *work problem*, vgl. Mayer, 1981) ist die folgende:

Ein Tischlermeister benötigt 2 Stunden, um eine Holztruhe zu reparieren, während sein Lehrling für die gleiche Aufgabe 4 Stunden braucht. Wie lange brauchen die beiden zur Fertigstellung der Truhe, wenn sie zusammen arbeiten?

Eine zentrale Annahme bezüglich der Bearbeitung einer solchen Textaufgabe ist, dass ein Problemlöser zunächst ein Verständnis der in der Aufgabe beschriebenen Ausgangssituation entwickeln muss, um in einem anschließenden Schritt sein domänenspezifisches Vorwissen auf die resultierende Aufgabenrepräsentation zur Lösung dieser Aufgabe anwenden zu können. Das Verstehen einer Textaufgabe beinhaltet dabei nicht nur die isolierte Repräsentation einzelner Elemente der Aufgabenbeschreibung, sondern basiert vor allem auch auf einer Wiedergabe wichtiger Zusammenhänge zwischen interagierenden Aufgabenelementen (vgl. Marcus, Cooper & Sweller, 1996; Sweller et al., 1998). In Einklang mit dieser Annahme gehen Modelle zum Verstehen mathematischer Textaufgaben (Cummins et al., 1988; Kintsch, 1998; Kintsch & Greeno, 1985; Nathan et al., 1992; Reusser, 1994; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992) davon aus, dass die Repräsentation einer Textaufgabe sowohl in einer Auflistung der einzelnen Textpropositionen (*textbase*) als auch in einem Situationsmodell (*situation model*) besteht. Dieses Situationsmodell beinhaltet eine qualitative Beschreibung der in einer Aufgabe vorkommenden Ereignisse und der Zusammenhänge zwischen Aufgabenelementen. Es basiert auf der Verwendung von Alltagsbegriffen bzw. auf den in der Aufgabenstellung vorkommenden Ob-

jektbezeichnungen, und in seine Konstruktion fließt allgemeines Weltwissen mit ein. Das Situationsmodell beinhaltet dabei nicht nur eine Repräsentation der lösungsrelevanten Eigenschaften oder Strukturmerkmale einer Aufgabe, sondern enthält auch Informationen über deren Oberflächenmerkmale z.B. über die semantische Einbettung der Aufgabe.

Wie mit diesem Situationsmodell der Aufgabe weiter verfahren wird, hängt davon ab, ob ein Problemlöser bereits über Schemata zur Lösung der Aufgabe verfügt oder ob ihm für die Aufgabebearbeitung lediglich konkretes Fallwissen über ähnliche, bereits gelöste Aufgaben zur Verfügung steht. Im Folgenden wird zunächst die Aufgabebearbeitung mit Hilfe von Aufgabenschemata beschrieben, bevor Annahmen zum analogen Problemlösen vorgestellt werden.

Schemabasiertes Problemlösen

Aufgabenschemata erlauben es dem Problemlöser, die in Form eines Situationsmodells repräsentierte Aufgabe als Instanz einer Aufgabenkategorie zu klassifizieren und die im Schema repräsentierte Lösungsprozedur auf die Aufgabe anzuwenden, ohne dass eine weitere Gedächtnissuche nach lösungsrelevantem Wissen vorgenommen werden muss (VanLehn, 1989, 1996). "Schemas are defined as mental constructs that allow patterns or configurations to be recognized as belonging to a previously learned category and which specify what moves are appropriate for that category" (Sweller & Cooper, 1985, S. 60).

Das Vorgehen beim schemabasierten Problemlösen (vgl. Abbildung 2) besteht darin, bei der Konfrontation mit einer neuen Aufgabe zunächst ein geeignetes Schema aus dem Gedächtnis abzurufen. Problemlöser mit einem sehr hohen Ausmaß an Expertise in einer Domäne verfügen dabei über stark spezialisierte und vor allem hoch automatisierte Schemata, so dass dieser Abrufprozess ohne bewusste Auseinandersetzung mit den Strukturmerkmalen der zu bearbeitenden Aufgabe erfolgen kann. In diesem Fall ähnelt der Abruf von Aufgabenschemata aus dem Gedächtnis einem automatisch ablaufenden Mustervergleichsprozess, auf dessen Basis das korrekte Aufgabenschema identifiziert wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass die in den eigenen Experimenten untersuchten Versuchspersonen dieses Expertiseniveau aufweisen, da dieses in der Regel die Auseinandersetzung mit einer Domäne für Tausende von Stunden voraussetzt (Chase & Simon, 1973; Simon & Chase, 1973; van Merriënboer, Clark & de Crook, 2002).

Vielmehr wird davon ausgegangen, dass Versuchspersonen, selbst wenn sie bereits über Aufgabenschemata in der Untersuchungsdomäne verfügen, bei der Konfrontation mit einer Aufgabe zunächst deren Strukturmerkmale erkennen müssen, um ein geeignetes Schema aus dem Gedächtnis abzurufen. Dieser Identifikationsprozess setzt eine bewusste Auseinandersetzung mit der Aufgabe voraus. Wurde ein Aufgabenschema identifiziert, liefert es ähnlich wie eine Schablone die relevante Struktur, um aus dem konkreten und qualitativ ausgerichteten Situationsmodell der Aufgabe ein abstrakteres und quantitatives Problemmodell (*problem model*) zu erstellen. „A set of algebraic problem schemas (templates for organizing problem-relevant information) provides the explicit, graphical cues to guide the construction of these problem models“ (Nathan et al., 1992, S. 332). Dieses Problemmodell ermöglicht es dann schließlich, die im Schema spezifizierten Lösungsprozeduren auf die Aufgabe anzuwenden. „This problem schema is the representational level at which students can apply formal calculation methods such as algebra for generating verifiable solutions“ (Nathan et al., 1992, S. 334). Diese Lösungsprozeduren können z.B. darin bestehen, eine Formel mit den konkreten Variablenwerten der Aufgabe zu instantiieren.

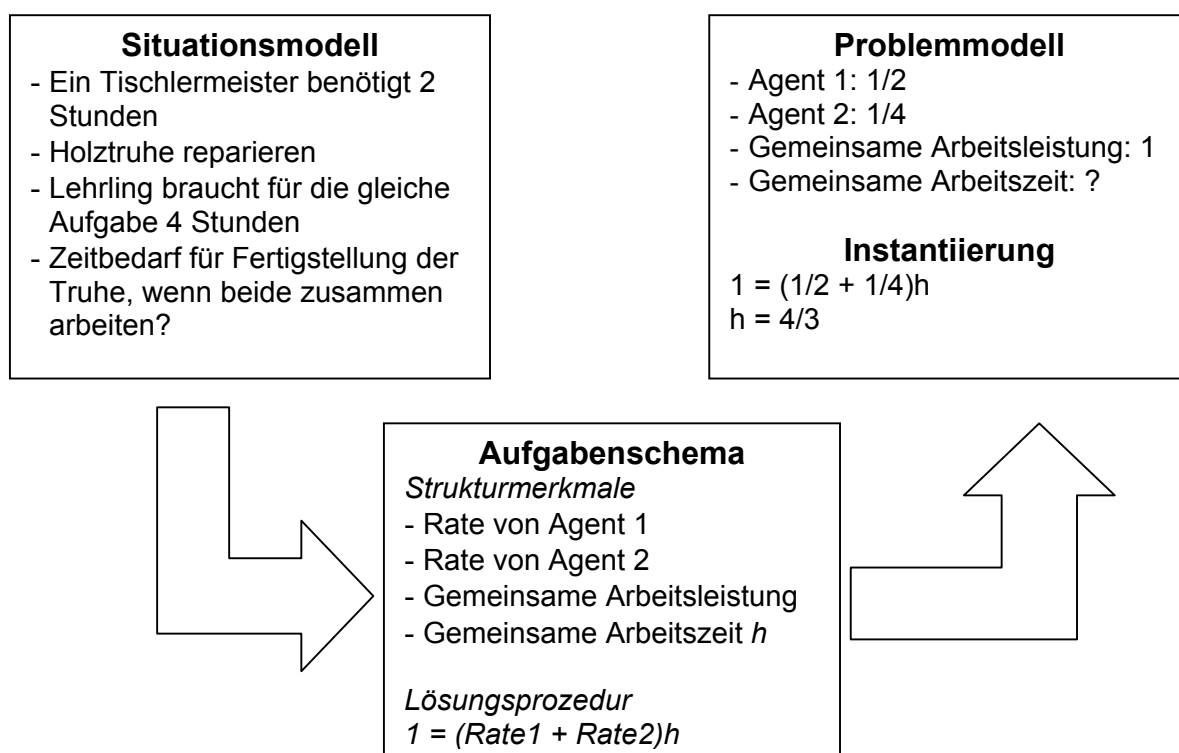


Abbildung 2: Schemabasiertes Problemlösen am Beispiel einer Algebraaufgabe

Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben mit Hilfe von Aufgabenschemata besteht im Wesentlichen darin, dass zur Lösung angewendete Schemata zunehmend automatisiert werden, so dass Arbeitsgedächtnisressourcen bei einem erneuten Einsatz dieser Schemata weniger stark beansprucht werden (Sweller et al., 1998).

Schemabasiertes Problemlösen stellt eine sehr effiziente Art der Aufgabenbearbeitung dar, setzt jedoch das Vorhandensein sehr elaborierter und auf viel Vorerfahrung beruhender Wissensstrukturen voraus. VanLehn (1989) bezeichnet diese Art des Vorgehens auch als *routine problem solving* und grenzt es von einem so genannten *nonroutine problem solving* ab, welches dann eingesetzt werden muss, wenn Problemlöser noch nicht über das für ein schemabasiertes Problemlösen vorausgesetzte Expertiselevel verfügen. In diesem Fall wird angenommen, dass Problemlöser auf frühere Problemlöseepisoden (d.h. auf Fallwissen) zurückgreifen und versuchen, die aktuelle Aufgabe *analog* zu der bereits gelösten Aufgabe zu bearbeiten. „The analogy mechanism is most likely to come into play when initial solution efforts based on available diachronic rules that describe the behavior of the target domain fail to generate an acceptable solution plan“ (Holyoak, 1985, S. 76).

Analoges Problemlösen

Entscheidend für die Feststellung einer Analogie zwischen zwei konkreten Instanzen ist, dass die beiden Instanzen nicht nur isolierte Einzelelemente bzw. Objekte miteinander teilen, sondern dass vor allem Relationen, die innerhalb einer Instanz zwischen einzelnen Objekten existieren, in gleicher Weise in der zweiten Instanz bestehen. „Analogy is similarity in which the same relations hold between different domains or systems“ (Gentner, 1999, S. 17). In Tabelle 3 sind zwei isomorphe Algebraaufgaben dargestellt, um an einem Beispiel analoge Beziehungen zwischen zwei Aufgabeninstanzen zu verdeutlichen. Zunächst gibt es Relationen zwischen Objekten innerhalb einer Instanz wie beispielsweise die Beziehung zwischen 'Friederike' und '3 Stunden'. Eine Analogie zu der zweiten Aufgabe besteht nun insofern, als dass die gleiche Relation zwischen 'Tischlermeister' und '2 Stunden' besteht, so dass eine Aussage der folgenden Art möglich ist: a verhält sich zu b wie x zu z , wobei a und b Propositionen der ersten Instanz und x und z Propositionen der zweiten Instanz darstellen. Eine Analogie zwischen zwei Instanzen ist demnach dann gegeben, wenn es möglich ist, Objekte einer Instanz auf Objekte einer zweiten Instanz abzubilden, so

dass gleichzeitig auch Relationen zwischen verschiedenen Objekten einer Instanz auf Relationen zwischen Objekten der zweiten Instanz abgebildet werden können.

Einzelne Relationen zwischen Objekten bilden dabei die Strukturmerkmale einer Aufgabe. Das relationale Netzwerk einer Aufgabe bzw. ihre Gesamtstruktur drückt sich in einer bestimmten Konfiguration von Strukturmerkmalen aus, die ihrerseits die Zugehörigkeit der Aufgabe zu einer Aufgabenkategorie festlegt (vgl. Kapitel 1 zur 'Definition struktureller Ähnlichkeit'). Diese Konfiguration der Strukturmerkmale besteht in dem Beispiel in Tabelle 3 darin, dass zwei Agenten mit unterschiedlichen Arbeitsraten eine gemeinsame Arbeitsleistung in einer zu berechnenden Arbeitszeit erbringen sollen. Für die eigentliche Aufgabebearbeitung irrelevant sind dagegen Kontextinformationen über die Agenten (Friederike, ihr Bruder Tom, der Tischlermeister und sein Lehrling) sowie über die Art der zu erbringenden Arbeitsleistung (das Streichen eines Zauns, das Reparieren einer Holztruhe). Diese Informationen bilden die Oberflächenmerkmale der Aufgaben.

Tabelle 3: Analogie am Beispiel zweier isomorpher Algebraaufgaben

Friederike benötigt 3 Stunden, um einen Zaun zu streichen, während ihr Bruder Tom die gleiche Arbeit in 6 Stunden erledigt. Wie lange brauchen die beiden zum Streichen des Zauns, wenn sie zusammen arbeiten?	Ein Tischlermeister benötigt 2 Stunden, um eine Holztruhe zu reparieren, während sein Lehrling für die gleiche Aufgabe 4 Stunden braucht. Wie lange brauchen die beiden zur Fertigstellung der Truhe, wenn sie zusammen arbeiten?
--	---

Die Nutzung analoger Beziehungen zwischen zwei Instanzen wird in der kognitiven Psychologie in mindestens drei verschiedenen Funktionen betrachtet: Erstens dient die Feststellung von Analogie der Abstraktion relevanter Gemeinsamkeiten verschiedener, deklarativ repräsentierter Instanzen (Analogie als *Lernmechanismus*). Zweitens handelt es sich bei Analogie um einen *Problemlösemechanismus*, bei dem Wissen aus früheren Problemlösesituationen zur Bearbeitung einer neuen Aufgabe eingesetzt wird. Drittens handelt es sich damit bei Analogie gleichzeitig um einen *Transfermechanismus*, da Wissen aus einer Situation auf eine neue Situation übertragen wird. Verschiedene Autoren sprechen auch allgemein von *analogical reasoning* oder *analogical inference* (Gentner & Markman, 1997; Holyoak & Thagard, 1997; Kolodner, 2002; Markman, 1997) um diesen verschiedenen Funktionen von Analogie ge-

recht zu werden. Analogie wird in der vorliegenden Arbeit in allen drei Funktionen angesprochen: Als Lernmechanismus ermöglicht Analogie den Erwerb von Aufgabenschemata (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Holyoak & Thagard, 1997). Darüber hinaus dienen Ansätze zum analogen Problemlösen und Transfer im Folgenden zur Beschreibung von Prozessen zur Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben und von Prozessen der Wissensübertragung. Bezogen auf die beiden letzten Funktionen werden die Begriffe ‚analoges Problemlösen‘ und ‚analoger Transfer‘ austauschbar verwendet, unter anderem weil die damit assoziierten Theorien sich sowohl als Problemlöse- als auch als Transfertheorien verstehen.

Carbonell (1986, S. 374) definiert analoges Problemlösen wie folgt: „Analogical problem solving consists of transferring knowledge from past problem solving episodes to new problems that share significant aspects with corresponding past experiences and using the transferred knowledge to construct solutions to the new problem.“

Aus einer kognitionswissenschaftlichen Perspektive ist die Nutzung vorangegangener Problemlöseerfahrungen zur Bearbeitung analoger aktueller Aufgaben Gegenstand zweier relativ unverbunden nebeneinander stehender Forschungstraditionen, dem fallbasierten Schließen (*case-based reasoning*; Kolodner, 1992, 1993, 2002; Riesbeck & Schank, 1989; Strube & Janetzko, 1990; Veloso, 1994; Weber, 1994) in der Künstlichen Intelligenz (KI) einerseits und dem analogen Problemlösen in der kognitiven Psychologie andererseits (Gentner, 1983; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Novick, 1988, 1995; Novick & Holyoak, 1991). Es wird hier auf kognitive Theorien analogen Problemlösens fokussiert, da diese im Gegensatz zu den stark formalisierten und auf Optimierung ausgerichteten Mechanismen der KI eher geeignet sind, menschliches Problemlösen und dabei auftretende Schwierigkeiten zu beschreiben.

Die wohl bekanntesten Theorien analogen Problemlösens bzw. analogen Transfers sind die *Structure Mapping* Theorie von Gentner (Clement & Gentner, 1991; Gentner, 1983; Gentner & Markman, 1994, 1997; Gentner, Rattermann & Forbus, 1993) sowie die *Multiconstraint* Theorie der Arbeitsgruppe um Holyoak (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Holyoak, 1985; Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1995, 1997), die beide in lauffähigen Computerimplementationen vorliegen (*SME: Structure Mapping Engine*, Gentner et al., 1993; *ACME: Analogical Constraint Mapping Engine*, Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1995). Beide Ansätze sind durch eine weitestgehend vollständigen

dige Übertragung der Lösung eines so genannten Quellproblems auf das zu lösende Zielproblem gekennzeichnet und werden daher auch als *transformational analogy* (Carbonell, 1986) oder Lösungsanalogie (Reimann, 1997) bezeichnet. Ein Quellproblem stellt dabei die Repräsentation einer früheren Problemlöseerfahrung dar und bildet somit Vorwissen in Form des oben beschriebenen Fallwissens.

Analoges Problemlösen wird als komplexer kognitiver Prozess verstanden, der grob in eine Such- und in eine Nutzungsphase unterteilt werden kann, die sich ihrerseits wiederum aus verschiedenen Teilprozessen zusammensetzen (Gick & Holyoak, 1980; Hesse & Hahn, 1994; Keane, Ledgeway & Duff, 1994; Novick, 1988, 1995; Novick & Holyoak, 1991; Reeves & Weisberg, 1994).

In der Suchphase wird zunächst eine mentale Repräsentation des Zielproblems (d.h. der zu lösenden Aufgabe; siehe oben) erstellt (*representation*), die als Ausgangsbasis dient, um potenziell als Quellprobleme geeignet erscheinende Problemlöseepisoden zunächst im Gedächtnis zu aktivieren (*reminding*) und aus diesen aktivierten Episoden schließlich eine als Quellproblem auszuwählen. Die anschließende Nutzungsphase setzt sich aus einer Suche nach strukturellen Entsprechungen zwischen dem Quell- und Zielproblem (*mapping*), der Übertragung von Lösungselementen des Quellproblems auf das Zielproblem (*inference*) sowie der Erschließung weiterer, zur Lösung des Zielproblems benötigter Lösungselemente über Musterergänzungsprozesse (*pattern completion*) zusammen. Eine Adaption des inferierten Lösungswegs des Quellproblems an die Besonderheiten des Zielproblems (*adaptation*) wird dann nötig, wenn die beiden Probleme nicht vollständig bezüglich ihrer Strukturmerkmale übereinstimmen (also bei nur partiell isomorphen Aufgaben). Die analoge Bearbeitung einer Aufgabe kann ihrerseits wiederum in Fallwissen resultieren. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Bearbeitung multipler isomorpher Aufgaben zur Abstraktion eines Aufgabenschemas für die entsprechende Aufgabenkategorie führt (*schema induction*).

Im Folgenden werden diejenigen Prozesse detaillierter beschrieben, die sich an den bereits dargestellten Prozess zur Repräsentation der zu lösenden Aufgabe anschließen. Diese Prozesse müssen nicht strikt in der dargestellten Reihenfolge ablaufen, vielmehr wird angenommen, dass verschiedene dieser Prozesse auch miteinander interagieren können (Blanchette & Dunbar, 2002; Holyoak & Koh, 1987; Ross & Bradshaw, 1994).

Aktivierung potenzieller Quellprobleme und Auswahl eines Quellproblems. Die Zielproblemrepräsentation aktiviert zunächst verschiedene potenziell als Quellprobleme geeignete Repräsentationen von Problemlöseepisoden im Gedächtnis (*reminders* nach Ross, 1984, 1989; *retrieval* nach Holyoak & Koh, 1987), von denen schließlich eine ausgewählt werden muss, um zur anschließenden Lösung des Zielproblems herangezogen zu werden (Gentner et al., 1993; Jones & Langley, 1995; Reeves & Weisberg, 1994). Während diese Unterscheidung in zwei Subprozesse in der Darstellung von Modellen zum analogen Problemlösen durchaus üblich ist, gibt es gewisse Unklarheiten bezüglich einer einheitlichen Begriffsverwendung für diese Prozesse. Holyoak und Koh (1987) bezeichnen beide Prozesse zusammen als *selection*: „Selection requires retrieval of the source analogue from memory and noticing of its relevance to the target problem“ (Holyoak & Koh, 1987, S. 332). In Anlehnung an Gentner (1999, S. 18) wird in dieser Arbeit der Oberbegriff *retrieval* verwendet, da er nach Auffassung der Autorin neutraler im Hinblick auf die beiden enthaltenen Teilkomponenten ist, während *selection* die Interpretation als 'Auswahl eines spezifischen Quellproblems' nahe legt und damit eher mit der zweiten Komponente assoziiert ist.

Ungeachtet dieser begrifflichen Uneinheitlichkeit herrscht in der Forschung zum analogen Problemlösen große Einigkeit darüber, dass der Schritt zur letztendlichen Auswahl eines Quellproblems eine zentrale Bedeutung im Problemlöseprozess einnimmt (Holyoak & Koh, 1987; Novick, 1988; Novick & Holyoak, 1991), und dass seine erfolgreiche Bewältigung kritisch für den nachfolgenden Problemlöseprozess ist (Schmid, Wirth & Polkehn, 2003).

Um den Abruf potenzieller Quellprobleme (*retrieval*) aus dem Gedächtnis zu beschreiben, postulieren Holyoak und Koh (1987) ein Aktivations-Summutations-Modell, wie es auch im Rahmen verschiedener kognitiver Architekturen eingesetzt wird (Anderson & Lebiere, 1998; Just & Carpenter, 1992). Nach diesem Modell bestehen Repräsentationen von Problemsituationen aus einzelnen Merkmalen. Merkmale der Zielproblemrepräsentation können Repräsentationen solcher Quellprobleme im Gedächtnis aktivieren, die ebenfalls durch diese Merkmale gekennzeichnet sind. Merkmale des Zielproblems können somit als Abrufreize für Quellprobleme fungieren. Über die gemeinsamen Merkmale der Repräsentationen eines potenziellen Quellproblems und des Zielproblems erfolgt eine Aktivationssummutation, so dass bei Überschreiten eines Aktivationsgrenzwerts das am höchsten aktivierte Quellproblem ab-

gerufen und weiter verarbeitet werden kann. „Activation from multiple shared features will summate, and if the activation level of a stored representation exceeds some threshold, that representation will become available for further processing, such as initiation of an explicit mapping process“ (Holyoak & Koh, 1987, S. 333f.).

Eine Konsequenz dieses einfachen Summationsmodells besteht darin, dass die Aktivierung von Quellproblemen weitestgehend unabhängig von der Art der Ähnlichkeit der Aufgaben erfolgt, da sowohl Übereinstimmungen hinsichtlich der Oberflächenmerkmale als auch Übereinstimmungen hinsichtlich lösungsrelevanter Strukturmerkmale zur Aktivierung eines entsprechenden Quellproblems führen können (vgl. auch Catrambone, 2002; Gentner et al., 1993). Allerdings entscheidet die Art und Weise, wie ein Problemlöser die Aufgaben repräsentiert hat, darüber, ob die Repräsentationen der potenziellen Quellprobleme sowie die Repräsentation des Zielproblems überhaupt gemeinsame Merkmale enthalten und ob es damit überhaupt zur Aktivationsausbreitung kommen kann (Ross & Kennedy, 1990; Shavlik, DeJong & Ross, 1987). Darüber hinaus geht Holyoak (1985) davon aus, dass vor allem Übereinstimmungen hinsichtlich solcher Merkmale, die mit dem Ziel der Problemlösung eng verknüpft sind, zur Aktivierungserhöhung beitragen.

However, the retrieval process will tend to be dominated by shared properties that are goal related, since the goal in the target problem will in large part determine which rules are executed, and hence which properties of components of the target will actually be activated.

(Holyoak, 1985, S. 80)

Strukturell ähnliche Quellprobleme haben außerdem nach Holyoak (1985) eine größere Wahrscheinlichkeit, aktiviert zu werden, da sie mehr Übereinstimmungen zum Zielproblem aufweisen: „Plausible source analogs will be those that are related to multiple components of the target problem“ (Holyoak, 1985, S. 80). Die Annahme, dass bereits bei der Aktivierung potenzieller Quellprobleme eher eine Orientierung an lösungsrelevanten Eigenschaften erfolgt, zusammen mit der Aussage, dass strukturell ähnliche Aufgaben auf Grund der größeren Anzahl geteilter Merkmale mehr Aktivierung durch das Zielproblem erhalten, führt dazu, dass letztendlich nach diesen Modellvorstellungen eher ein Quellproblem ausgewählt wird (indem es den Aktivations-Schwellenwert überschreitet), das zur Lösung des Zielproblems geeignet ist. Das *retrieval*-Modell Holyoaks geht damit von einer Beeinflussung des Aktivati-

onsprozesses durch Oberflächenähnlichkeiten aus, nimmt aber gleichzeitig an, dass die Auswahl eines geeignet erscheinenden Quellproblems durch strukturelle Kriterien dominiert wird.

In ähnlicher Weise postuliert Gentner (Gentner et al., 1993), dass die Aktivierung von potenziellen analogen Quellproblemen in einem großen Ausmaß von Oberflächenähnlichkeiten zwischen Ziel- und Quellproblem gesteuert wird, während strukturelle Ähnlichkeiten (*soundness*) bestimmen, welches Quellproblem für den nachfolgenden *mapping*-Prozess ausgewählt wird. Diese Annahmen zu einem zweistufigen Ähnlichkeitsgesteuerten Abrufprozess werden in der Simulation MAC/FAC („Many are called but few are chosen“) realisiert (Forbus, Gentner & Law, 1995; Gentner et al., 1993).

Um ein Quellproblem zu identifizieren, welches eine hohe Übereinstimmung zum Zielproblem im Hinblick auf lösungsrelevante Strukturmerkmale aufweist, während kontextuelle Eigenschaften des Problems unberücksichtigt bleiben sollten, sind „Prozesse der Abstraktion oder Dekontextualisierung von konkreten Merkmalseinbettungen im Zielproblem“ sowie „Analysen zu zielproblemrelevanten Eigenschaften“ (Hesse & Hahn, 1994, S. 91) notwendig. Dieser normativen Vorstellung steht eine Vielzahl empirischer Befunde gegenüber, die zeigen, dass Problemlöser oberflächlichen Ähnlichkeiten eine mindestens ebenso große Bedeutung bei der Aktivierung von potenziellen Quellproblemen und aber auch bei der Auswahl eines Quellproblems zuweisen wie Strukturmerkmalen (Holyoak & Koh, 1987; Ross, 1985, 1987, 1989). Auf diese empirischen Befunde sowie auf die damit verbundene theoretische Diskussion wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen, da sie von zentraler Bedeutung sind, um Aussagen darüber zu treffen, unter welchen Bedingungen es zu einem erfolgreichen analogen Transfer und damit zur Entstehung von Sequenzeffekten kommt.

Wurde ein – mehr oder weniger geeignetes – Quellproblem ausgewählt, besteht der nächste Schritt darin, die Lösung dieses Quellproblems zur Lösung des Zielproblems heranzuziehen. Diese Nutzungsphase setzt sich aus mehreren Subprozessen zusammen (*mapping*, *inference*, *pattern completion* und *adaptation*), die an den bereits eingeführten Beispielaufgaben erläutert werden (vgl. Tabelle 4). Die letzten beiden Schritte sind nicht in der Tabelle abgebildet, sondern werden im Text erläutert.

Mapping. Das oftmals als Herzstück analogen Problemlösens bezeichnete *mapping* besteht in der Feststellung der oben beschriebenen analogen Beziehungen bzw. in

der Konstruktion von Übereinstimmungen zwischen Quell- und Zielproblem: „the construction of orderly correspondences between the elements of a source analog and those of a target“ (Holyoak & Thagard, 1989b, S. 295). Zunächst gilt es, Ähnlichkeiten in den Repräsentationssystemen der beiden Probleme festzustellen, die sich auf die Relationen der Propositionen in den Repräsentationen beziehen (Gick & Holyoak, 1980). Wird eine Übereinstimmung zwischen einer Relation innerhalb des Quellproblems mit einer Relation innerhalb des Zielproblems erkannt, werden die Propositionen, die durch diese Relationen miteinander verbunden sind, aufeinander bezogen. In dem dargestellten Beispiel besteht der *mapping*-Prozess z.B. darin zu erkennen, dass sich 'Friederike' zu '3 Stunden' genauso verhält wie 'Tischlermeister' zu '2 Stunden'. Der *mapping*-Prozess ist nicht nur entscheidend im Hinblick auf die Lösung des Zielproblems, sondern bietet darüber hinaus die Basis zum Erwerb von Aufgabenschemata, in denen die Gemeinsamkeiten isomorpher Aufgaben repräsentiert sind (siehe unten).

Bezüglich der Auswahlkriterien, die bestimmen, für welche Merkmale Korrespondenzen zwischen Quell- und Zielproblem im Sinne eines *mappings* konstruiert werden, werden unterschiedliche theoretische Positionen vertreten. Einige Autoren (z.B. Ortony, 1979) nehmen an, dass vor allem die relative Wichtigkeit oder Salienz bestimmter Eigenschaften innerhalb einer Domäne determiniert, welche Merkmale beim *mapping* berücksichtigt werden. Nach Gentners *Structure Mapping* Theorie (1983, 1989; Gentner & Markman, 1997) hingegen wird eine Auswahl und Interpretation von Korrespondenzen beim *mapping* ausschließlich auf der Basis struktureller Merkmale der Wissensrepräsentationen getroffen – losgelöst von inhaltlichen Merkmalen der Domäne. Nach dem so genannten *systematicity principle* haben dabei Netzwerke von Relationen eine höhere Wahrscheinlichkeit, auf eine andere Situation übertragen zu werden als einzelne relationale Beziehungen zwischen Wissensstrukturen.

The principle that people (a) preferentially include in an analogical mapping those matches that are embedded in a higher-order structure containing other matching elements, and (b) make new inferences in the target domain by mapping across further elements of the base domain that belong to a largely matching structure.

(Clement & Gentner, 1991, S. 123f.)

Die beim *mapping* berücksichtigten Relationen basieren nach Ansicht von Gentner also nicht auf einfachen Objektähnlichkeiten von Aufgaben (wie z.B. einfache Über-

einstimmungen zwischen Objekt-Attribut-Relationen), sondern es werden vor allem so genannte *higher order relations* berücksichtigt, die oftmals übergeordnete abstrakte Prinzipien oder kausale Strukturen wiedergeben. Clement und Gentner (1991) konnten in einer Serie von Experimenten dieses *systematicity principle* empirisch untermauern, indem sie zeigten, dass Versuchspersonen solche Fakten als besonders relevant für eine bestehende Analogie beurteilten, die in ein Netzwerk kausaler Strukturen eingebettet waren. Wurden die Versuchspersonen aufgefordert, für eine vorgegebene Situation Vorhersagen aus einem Vergleich mit einer analogen Situationsbeschreibung abzuleiten, bevorzugten sie außerdem solche Aussagen, die auf Übereinstimmungen der beiden Situationen hinsichtlich der kausalen Struktur aufbauten.

Eine Kritik an der *Structure Mapping* Theorie bezieht sich auf diese rein syntaktische Vorgehensweise, mit der mögliche Relationen zum *mapping* herangezogen werden, und bei der sowohl domänenspezifische Merkmale als auch semantische Ähnlichkeiten oder auch pragmatische Ziele, die mit dem *mapping* verfolgt werden, unberücksichtigt bleiben. Entsprechende Ergänzungen des Auswahlprozesses um genau diese Kriterien werden in der *Multiconstraint* Theorie (Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1995) vorgenommen. Nach diesem Ansatz steuern im Wesentlichen drei Randbedingungen, welche Objekte und Relationen aufeinander abgebildet werden – nämlich semantische Ähnlichkeit (*semantic similarity*), strukturelle Konsistenz (*structural consistency*) und pragmatische Relevanz (*pragmatic centrality*). Semantische Ähnlichkeit der Objekte beeinflusst nach dieser Theorie nicht nur, welches der möglichen Quellprobleme aus dem Gedächtnis abgerufen wird, sondern lenkt zumindest auch das anfängliche *mapping*, indem vor allem semantisch ähnliche Objekte aufeinander bezogen werden. Je dichter das Netzwerk möglicher Korrespondenzen zwischen Objekten des Ziel- und des Quellproblems ist, desto größer ist jedoch die Notwendigkeit, auf die strukturelle Konsistenz dieser Bezüge zu achten (Gentner, 1983). „The key structural constraint underlying analogical mapping and inference is a pressure to establish an *isomorphism* - a set of consistent, one-to-one correspondences - between the elements of the source and the target“ (Holyoak & Thagard, 1997, S. 36). Holyoak und Thagard (1989) betonen allerdings auch, dass das Erstellen eines Isomorphismus einen Idealzustand darstellt, der für die interessierenden psychologischen Phänomene nicht immer erfüllt sei. Um der Unvollständigkeit und zumindest partiellen Mehrdeutigkeit von Analogien gerecht zu werden, verweisen sie

darauf, dass es sich beim analogen *mapping* lediglich um eine Approximation an einen Isomorphismus im streng mathematischen Sinne handele (d.h. um einen partiellen Isomorphismus). Schließlich wird die Frage danach, welche Objekte des Zielproblems mit welchen Objekten des Quellproblems korrespondieren, auch durch den pragmatischen Zweck, der mit der Analogie verbunden ist bzw. durch das Ziel, das mit ihr angestrebt wird, gesteuert. Nach Holyoak (1985; Holyoak & Thagard, 1989a, b; Spellman & Holyoak, 1992, 1996) werden bevorzugt diejenigen Objekte aufeinander bezogen, die die gleichen pragmatischen Rollen (z.B. Mittel, Hindernisse oder Teilziele) im Hinblick auf die Zielerreichung einnehmen, so dass bei unterschiedlichen Zielvorgaben die Präferenz für verschiedene potenzielle Korrespondenzen variieren kann. Die erstellten Korrespondenzen zwischen Quell- und Zielproblem werden schließlich dazu genutzt, eine Lösung für das Zielproblem zu inferieren (*inference*).

Inferenz. Mit Hilfe des Inferenzprozesses wird eine Zielproblemlösung generiert, die analog zur Lösung des Quellproblems aufgebaut ist. Dabei werden die Elemente der bekannten Problemlösung zunächst kopiert und dann jeweils durch die dem *mapping* entsprechenden Elemente der aktuellen Problemsituation ersetzt. Es findet folglich eine Transformation der Quellproblemlösung in eine Zielproblemlösung statt (vgl. *transformational analogy*, Carbonell, 1986). Im Beispiel aus Tabelle 4 bedeutet dies, dass die zur Lösung des Quellproblems benötigte Gleichung zur Bestimmung der gemeinsamen Arbeitsrate auf das Zielproblem übertragen wird, wobei die Arbeitsraten von Friederike und Tom durch die Arbeitsraten des Tischlermeisters und seines Lehrlings ersetzt werden.

Tabelle 4: Analoges Problemlösen: *Mapping* und Inferenz

Quellproblem	Zielproblem
Friederike benötigt 3 Stunden, um einen Zaun zu streichen, während ihr Bruder Tom die gleiche Arbeit in 6 Stunden erledigt. Wie lange brauchen die beiden zum Streichen des Zauns, wenn sie zusammen arbeiten?	Ein Tischlermeister benötigt 2 Stunden, um eine Holztruhe zu reparieren, während sein Lehrling für die gleiche Aufgabe 4 Stunden braucht. Wie lange brauchen die beiden zur Fertigstellung der Truhe, wenn sie zusammen arbeiten?
<p>Lösung:</p> <p>Friederike: $1/3$</p> <p>Tom: $1/6$</p> $1 = (1/3 + 1/6)h$ $1 = 3/6 \text{ h}$ $h = 6/3 = 2$	<p>Lösung:</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">?</p>
Mapping	
- Friederike benötigt 3 Stunden	↔ - Tischlermeister benötigt 2 Stunden
- Tom: gleiche Arbeit in 6 Stunden	↔ - Lehrling: gleiche Aufgabe 4 Stunden
- wenn sie zusammen arbeiten	↔ - wenn sie zusammen arbeiten
Inferenz	
Friederike: $1/3$	⇒ Tischlermeister: $1/2$
Tom: $1/6$	⇒ Lehrling: $1/4$
Streichen des Zauns → $1 = (1/3 + 1/6)h$	⇒ Reparieren der Truhe → $1 = (1/2 + 1/4)h$
$1 = 3/6 \text{ h}$	⇒ $1 = 3/4h$
$h = 6/3 = 2$	⇒ $h = 4/3$

Musterergänzung. In machen Fällen ist es nicht möglich, die Quellproblemlösung direkt in eine Zielproblemlösung zu transformieren, da zunächst auf der Basis von Musterergänzungsprozessen (*pattern completion* nach Holyoak, Novick & Melz, 1994) fehlende Information ergänzt werden muss, die sich nicht aus den aufgestellten Korrespondenzen ergibt. „Because the test problem lacks solution elements, solvers cannot map the example problem’s solution onto the test problem. Rather, they must use the mapping to help them generate inferences to fill in the missing information about the test problem“ (Novick, 1995, S. 6). Stellt man sich beispielsweise

vor, in der Aufgabenbeschreibung des Zielproblems in Tabelle 3 stünde anstelle 'sein Lehrling braucht für die gleiche Aufgabe 4 Stunden' die Formulierung 'sein Lehrling braucht für die gleiche Aufgabe zwei Stunden länger als er', bestünde eine Aufgabe des Problemlösers zunächst darin zu erkennen, dass der Lehrling somit vier Stunden für die Bewältigung der Aufgabe benötigt, indem er die Proposition 'zwei Stunden länger als er' mit der Information in Relation setzt, dass der Tischlermeister zwei Stunden zum Reparieren der Holztruhe benötigt. Sowohl theoretische (Holyoak, et al., 1994) als auch empirische Analysen (Novick, 1995) haben dabei gezeigt, dass Musterergänzungsprozesse auf dem vorangehenden *mapping* aufbauen und dass ihr Erfolg wesentlich durch die Güte der bereits festgestellten Korrespondenzen determiniert ist.

Adaption. Während bei isomorphen Aufgaben ein vollständiges Übertragen der Lösung möglich ist (gegebenenfalls ergänzt durch die gerade beschriebenen Musterergänzungsprozesse), erfordern ähnliche (d.h. nur partiell isomorphe) Aufgaben eine Adaption des Lösungswegs des Quellproblems an die Besonderheiten des Zielproblems (*adaptation*). Bezogen auf das Beispiel könnte man sich vorstellen, dass im Zielproblem danach gefragt würde, wie lange der Tischlermeister und sein Lehrling zur Fertigstellung der Truhe benötigen würden, wenn sie zusammen daran arbeiten und wenn der Lehrling bereits eine Stunde vorgearbeitet hat. In diesem Fall müsste im Lösungsweg für das Zielproblem berücksichtigt werden, dass bereits zum Zeitpunkt der Arbeitsteilung ein Viertel der Arbeit von dem Lehrling abgeleistet war, woraus sich die folgende adaptierte Gleichung ergäbe: $1 - 1/4 = (1/2 + 1/4)h$.

Erwerb von Fallwissen und Schemainduktion. Das bearbeitete Zielproblem sowie die auf der Basis analoger Problemlöseprozesse generierte Lösung können in Form zusätzlichen Fallwissens mental repräsentiert werden. Liegt bereits Fallwissen über mehrere, strukturell identische Problemsituationen vor, über das abstrahiert werden kann, kann es darüber hinaus zum Erwerb eines Aufgabenschemas kommen (Catrambone & Holyoak, 1989; Cooper & Sweller, 1987; Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Reed & Bolstad, 1991; Spiro, Feltovich, Coulson & Anderson, 1989; Sweller & Cooper, 1985; Quilici & Mayer, 1996). Bezüglich dieses als Generalisierung (VanLehn, 1996), als Schemainduktion (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983) oder einfach als Lernen (Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1997; Ross & Kennedy, 1990) bezeichneten Schritts wird erstens diskutiert, ob er im Sinne eines zusätzli-

chen, deliberativen Vergleichs- und Induktionsprozesses zu verstehen ist (Anderson, 1983; Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Reeves & Weisberg, 1994) oder ob er eine mehr oder weniger automatische Folge von Problemlöseprozessen auf der Basis von Fallwissen selbst darstellt (Medin & Ross, 1989; Ross & Kennedy, 1990). Zweitens werden in der Forschung zur Schemainduktion unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der Frage vertreten, ob konkretes Fallwissen auch im Anschluss an die Schemainduktion erhalten bleibt (*conservative induction*; Hinsley, Hayes & Simon, 1977; Medin & Ross, 1989; Reeves & Weisberg, 1994) oder ob Wissen bezüglich konkreter Aufgabenmerkmale aus der Gedächtnisrepräsentation eliminiert wird, so dass es keinen weiteren Einfluss auf z.B. anschließende Problemlöseprozesse hat (*eliminative induction*; Mackie, 1974). Befunde von Hinsley und Kollegen (1977) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Aufgabenschemata selbst Repräsentationen lösungsirrelevanter Oberflächenmerkmale enthalten können: So entschieden ihre Versuchspersonen auf Grund der semantischen Einbettung einer Aufgabe über deren Zugehörigkeit zu einer Aufgabenkategorie, wenn diese semantische Einbettung typisch für die Aufgabenkategorie war.

Zusammenfassung und Fazit: Lernen bei der Aufgabenbearbeitung

Ziel des vorliegenden Abschnitts war es einerseits zu zeigen, dass sich die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben deutlich von der voraussetzungsarmer Aufgaben unterscheidet und dass darüber hinaus die zur Bearbeitung dieser Aufgaben eingesetzten Vorgehensweisen davon abhängen, in welcher Form domänenspezifisches Vorwissen vorhanden ist. Verfügen Problemlöser bereits über ein hohes Expertiselevel in einer Domäne, können sie voraussetzungsreiche Aufgaben auf der Basis abstrakter Aufgabenschemata interpretieren und Lösungsprozeduren direkt auf die Aufgabe bzw. auf deren abstrakte Repräsentation in Form eines Problemmodells anwenden. Problemlöser, die jedoch erst sporadische Erfahrungen mit einer Domäne haben, besitzen dagegen nur episodisches Fallwissen aus der früheren Bearbeitung ähnlicher Aufgaben oder aus der Konfrontation mit ausgearbeiteten Beispielen. Diese Problemlöser sind darauf angewiesen, eine aktuelle Aufgabe analog zu diesen früheren Problemlöseepisoden zu bearbeiten. Analoges Problemlösen auf der Basis von Fallwissen besteht in einem aufwändigen Prozess der Nutzung konkreter Problemlöseepisoden zur Konstruktion von Lösungen für neue Aufgaben, dessen Erfolg

von verschiedenen Randbedingungen abhängt, die vor allem in Kapitel 3 erörtert werden.

Lernen bei der Aufgabenbearbeitung als eine wesentliche Komponente für die Entstehung von Sequenzeffekten unterscheidet sich in Abhängigkeit von der eingesetzten Problemlösemethode: Während es beim Einsatz schemabasierter Problemlösemethoden vor allem zu einer Automatisierung der bereits vorhandenen Schemata kommt, zeichnet sich analoges Problemlösen dadurch aus, dass zusätzliche Wissensstrukturen angelegt werden. Diese können erstens darin bestehen, dass zusätzliches Fallwissen generiert wird, indem eine mentale Repräsentation der Aufgabe zusammen mit ihrer Lösung im Gedächtnis angelegt wird. Zweitens können aus der Bearbeitung einer Aufgabe in Analogie zu einer früheren Problemlöseepisode Aufgabenschemata induziert werden (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983) – vorausgesetzt, es liegt bereits hinreichendes Fallwissen über mehrere, strukturell identische Problemsituationen vor, über das abstrahiert werden kann. Sowohl die Generierung von Fallwissen als auch die Schemainduktion bestehen nach Auffassung der verschiedenen hier zitierten Autoren im Erwerb deklarativer, merkmalsbasierter – im Gegensatz zu prozeduralen, fertigkeitbasierten – Wissensrepräsentationen.

Im nächsten Abschnitt wird dargestellt, wie Unterschiede zwischen voraussetzungsarmen und voraussetzungsreichen Aufgaben den Transferprozess zwischen aufeinander folgenden Aufgaben beeinflussen. Dieser stellt neben Lernprozessen bei der Aufgabenbearbeitung die zweite wesentliche Komponente zur Erklärung von Sequenzeffekten dar.

2.2.2 Transfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

Für voraussetzungsarme Aufgaben wurde angenommen, dass es sich bei dem Transferprozess um einen weitestgehend automatischen Prozess handelt, bei dem das bei der Bearbeitung einer Aufgabe erworbene Wissen auf nachfolgende Aufgaben angewendet wird, ohne dass diese Anwendung deliberativ angeregt werden muss. Diese Art des Transfers wurde in Anlehnung an Salomon und Perkins (1989) als so genannter *low road* Transfer bezeichnet.

Salomon und Perkins (1989) grenzen diesen automatischen, ohne bewusste Anstrengung verlaufenden Übertragungsprozess von so genanntem *high road* Transfer ab, der dann zu beobachten ist, wenn die Nutzung vorangegangener Erfahrungen

bei einer neuen Anforderung einen deliberativen Abstraktionsprozess und damit eine bewusste Anstrengung voraussetzt. Diese Art von Transfer beruht auf dem Einsatz metakognitiver Kontrollprozesse bei der Nutzung vorangegangener Problemlöseerfahrungen. Diese Kontrollprozesse bestehen in einer Überwachung und Regulation der kognitiven Prozesse, die zur Lösung eines Problems eingesetzt werden (Flavell, 1984). Nach dieser Auffassung kommt es zu einem erfolgreichen Transfer nur unter bestimmten Bedingungen: „Successful transfer occurs when the problem solver is able to recognize the requirements of the new problem, select previously learned specific and general skills that apply to the new problem, and monitor their application in solving the new problem“ (Mayer & Wittrock, 1996, S. 50).

Es wird im Folgenden die Auffassung vertreten, dass für die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben von einem *high road* Transfer ausgegangen werden muss, der unter anderem davon abhängen sollte, ob ein Problemlöser strukturelle Ähnlichkeiten zwischen zwei Aufgaben erkannt hat und zu nutzen weiß. Für Problemlöser, die bereits über ein hohes Expertiselevel verfügen, wird angenommen, dass sie zu bearbeitende Aufgaben mit Hilfe vorhandener Aufgabenschemata interpretieren und dann ein geeignetes Aufgabenschema zur Lösung einsetzen. Im Fall hoch automatisierter Aufgabenschemata ist sogar denkbar, dass diese Schemata ohne bewusste Anstrengung im Sinne eines *low road* Transfers auf neue Aufgaben übertragen werden.

Fehlt jedoch abstraktes Wissen über die Zugehörigkeit einer Aufgabe zu einer bestimmten Aufgabenkategorie und über die mit dieser Kategorie assoziierte Lösungsprozedur, dann müssen Aufgaben unter Bezug auf konkretes Fallwissen bearbeitet werden. In den eben beschriebenen Modellen analogen Problemlösens, bei denen es sich ja gleichzeitig um Modelle zur Beschreibung von Transferprozessen handelt, ist eine entscheidende Annahme, dass die Wahrnehmung von Ähnlichkeiten und deren Beurteilung als oberflächlich oder strukturell darüber entscheidet, zwischen welchen Aufgaben überhaupt ein Transfer versucht wird und welche Korrespondenzen genutzt werden, um aus dem Wissen über eine frühere Problemlöseepisode eine Lösung für die aktuelle Aufgabe zu konstruieren.

Während für strukturell ähnliche voraussetzungsarme Aufgaben ein automatischer Transfer vorhergesagt wird und nachweisbar ist, setzt ein analoger Transfer zwischen strukturell ähnlichen voraussetzungsreichen Aufgaben die erfolgreiche Ausführung verschiedener aufwändiger kognitiver Prozesse voraus. Es wird im Folgen-

den die Auffassung vertreten, dass – vor allem um korrekte Vorhersagen zum Transfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben machen zu können – eine genaue Definition struktureller Ähnlichkeit notwendig ist.

Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt, kann strukturelle Ähnlichkeit zwischen zwei Aufgaben einerseits anhand der Lösungsprozeduren oder Regeln beschrieben werden, die benötigt werden, um die beiden Aufgaben zu lösen. Je größer die Überlappung zwischen den Lösungsprozeduren der beiden Aufgaben ist, desto strukturell ähnlicher sind zwei Aufgaben (Singley & Anderson, 1989). Diese Ähnlichkeit wurde als *prozedural* gekennzeichnet (Chen, 2002) und von *deklarativer Ähnlichkeit* abgegrenzt, die über den Grad der Überlappung hinsichtlich der Strukturmerkmale definiert wird. Aus einer objektiven, aufgabenanalytischen Perspektive ist diese Differenzierung bedeutungslos, da eine Übereinstimmung der Strukturmerkmale zweier Aufgaben automatisch eine Übereinstimmung der Lösungsprozeduren mit sich bringt.

Die Bestimmung struktureller Ähnlichkeit als prozedurale Ähnlichkeit ist dann hinreichend, um Transfervorhersagen zu treffen, wenn – wie bei voraussetzungsarmen Aufgaben – davon auszugehen ist, dass das zur Aufgabenbearbeitung benötigte Wissen bereits in Form abstrakter Regeln vorliegt, die direkt zur Lösung einer Aufgabe angewendet werden können. Die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben beruht dagegen vor allem im Fall analogen Problemlösens auf der Nutzung konkreter deklarativer Repräsentationen früherer Problemlöseepisoden, die mit deklarativen Repräsentationen einer zu lösenden Aufgabe verglichen werden (Gick & Holyoak, 1980, 1987; Holyoak & Koh, 1987; Ross, 1984; Vosniadou & Ortony, 1989). Bedeutsam ist hier nicht die objektive Aufgabenähnlichkeit, welche sowohl prozedural als auch deklarativ definierbar ist, sondern die vom Problemlöser wahrgenommene Ähnlichkeit, welche je nach der Qualität der deklarativen Aufgabenrepräsentationen mehr oder weniger stark von der objektiv vorhandenen strukturellen Ähnlichkeit abweichen kann (Vosniadou & Ortony, 1989). Die Fähigkeit zur Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten ist eine von mehreren Bedingungen für einen erfolgreichen analogen Transfer, auf die in Abschnitt 3.2 näher eingegangen wird.

2.2.3 Zusammenfassung und Fazit

Zwischen voraussetzungsarmen und voraussetzungsreichen Aufgaben bestehen wesentliche Unterschiede, die für die Entstehung von Sequenzeffekten relevant sind und die sich darauf beziehen, ob (1) domänenspezifisches Vorwissen bei der Aufga-

benrepräsentation und –bearbeitung einen wesentlichen Einfluss hat oder nicht und ob (2) die Aufgabenstellung im Wesentlichen aus wenigen, lösungsrelevanten Reizen besteht oder ob die Aufgaben eine starke semantische Einbettung haben, die eine Differenzierung zwischen Oberflächenmerkmalen und Strukturmerkmalen bei der Aufgabeninterpretation und –bearbeitung nötig macht. Diese Unterschiede führen dazu, dass sowohl die Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung als auch Transferprozesse als Basis für Sequenzeffekte voneinander differieren (Abbildung 3).

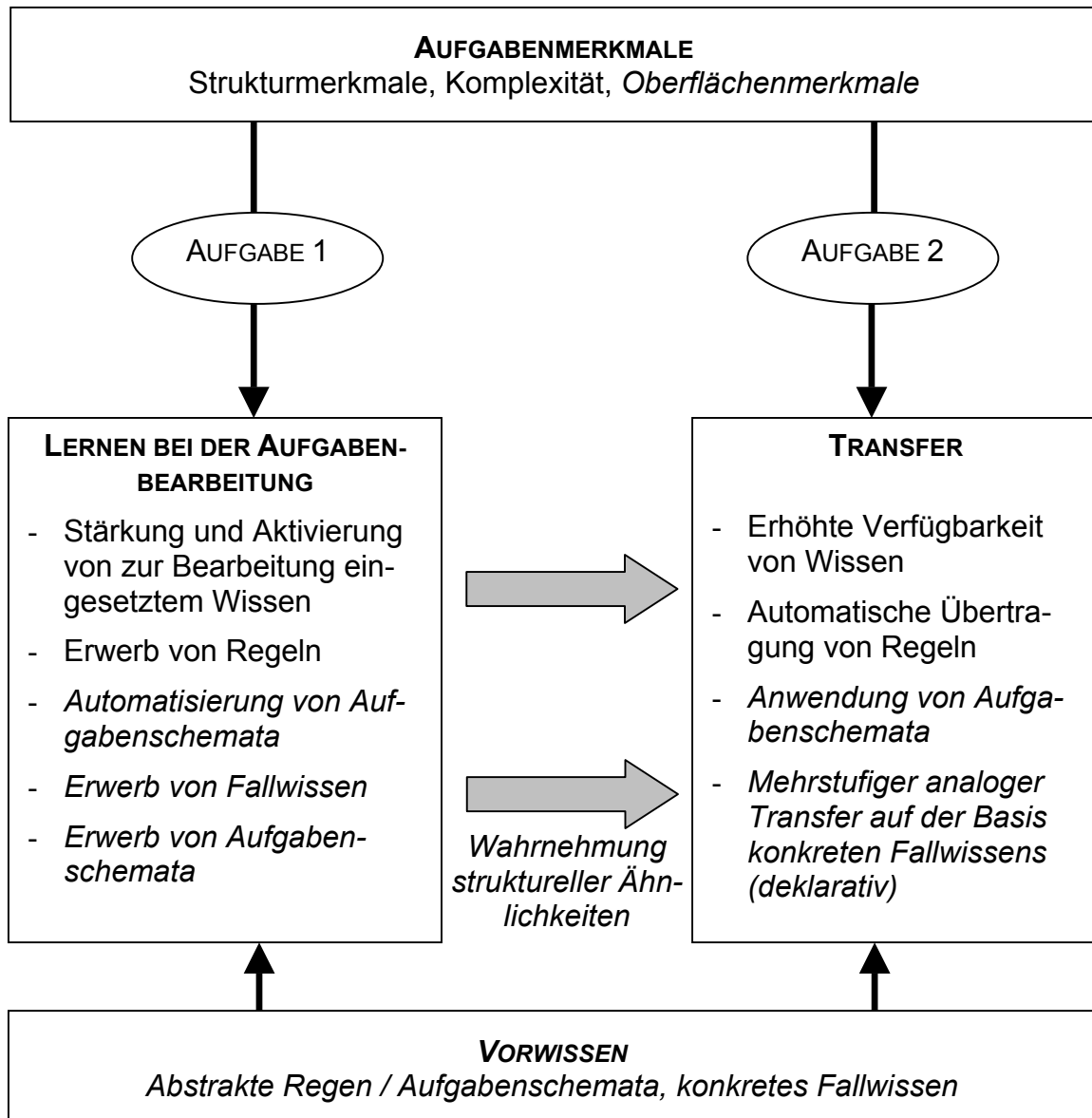


Abbildung 3: Rahmenkonzeption zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer und voraussetzungsreicher Aufgaben (Ergänzungen gegenüber Abbildung 1 sind kursiv dargestellt)

Für voraussetzungsarme Aufgaben besteht der Lernprozess vor allem in einer zunehmenden Aktivierung lösungsrelevanter Regeln sowie in der Generierung neuer Regeln, während bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben mit Hilfe analoger Problemlösemethoden in großem Ausmaß neue Wissensstrukturen in Form von Fallwissen und Aufgabenschemata angelegt werden. Für Experten, die voraussetzungsreiche Aufgaben schemabasiert bearbeiten können, besteht Lernen bei der Aufgabenbearbeitung in einer zunehmenden Automatisierung der zur Problemlösung eingesetzten Aufgabenschemata (Sweller et al., 1998).

Der Transferprozess ist bei voraussetzungsarmen Aufgaben weitestgehend automatisch und nur davon abhängig, ob strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben faktisch bestehen, so dass die Regeln zur Lösung einer Aufgabe auf eine nachfolgende Aufgabe übertragen werden können. Bei voraussetzungsreichen Aufgaben hängt ein Transfer dagegen auch wesentlich davon ab, ob strukturelle Ähnlichkeiten zwischen deklarativen Aufgabenrepräsentationen erkannt und entsprechend genutzt werden. Während die Verfügbarkeit von Vorwissen in Form abstrakter Aufgabenschemata eine einfache Übertragung dieser Schemata auf die neue Aufgabe möglich macht, handelt es sich bei analogem Transfer auf der Basis konkreten Fallwissens um einen mehrstufigen und fehleranfälligen Prozess, der vor allem auch von den Ausprägungen lösungsirrelevanter Oberflächenmerkmale der Aufgaben mit beeinflusst wird.

Die Rahmenkonzeption zur Erklärung der Entstehung von Sequenzeffekten wurde bewusst allgemein formuliert, um solchen Unterschieden zwischen Aufgabenklassen und sich daraus ergebenden Divergenzen hinsichtlich der für Sequenzeffekte verantwortlichen Prozesse gerecht werden zu können. Nachdem diese Differenzen herausgearbeitet wurden, stellt sich die Frage, ob das Rahmenmodell präziser formuliert werden kann, ohne dass dabei die Besonderheiten verschiedener Aufgabenklassen aus dem Blickfeld geraten. Unter anderem wäre es wünschenswert, die aus sehr unterschiedlichen Forschungsbereichen stammenden Begrifflichkeiten z.B. für verschiedene Arten des Lernens oder des Transfers stärker als bisher geschehen in einer einheitlichen Sprache zu formulieren. Außerdem zeichnet sich ab, dass manche der Prozessannahmen, die für die schemabasierte Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben getroffen wurden, relativ große Ähnlichkeiten zu Annahmen für die Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben haben. Dieser Tatsache kann man allerdings in dem jetzigen Modell nur bedingt gerecht werden. Eine Möglichkeit, dem

Dilemma zwischen Präzision und Gültigkeitsbereich eines Modells zu entgehen, besteht darin, eine kognitive Architektur hinzuzuziehen.

Kennzeichnend für kognitive Architekturen ist der Anspruch, eine umfassende Theorie menschlicher kognitiver Leistungen zu liefern, die es erlaubt, möglichst viele Befunde aus verschiedenen Anwendungsbereichen (Denken, Problemlösen, Entscheiden, Lernen und Gedächtnis) zu beschreiben, zu erklären und vorherzusagen (Tack, 1987). Kognitive Architekturen stellen damit zumindest eine approximative Lösung für die Forderung Newells (Newell, 1990) dar, eine *unified theory of cognition* zu formulieren, die einen möglichst umfassenden Geltungsbereich haben sollte.

In Kapitel 3 wird daher versucht, mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT-R 4.0 (*Atomic Components of Thought – Rational*; Anderson & Lebiere, 1998) bzw. mit ihren Vorgängerversionen ACT* (*Adaptive Control of Thought*; Anderson, 1983) sowie ACT-R 2.0 (Anderson, 1993) ein kognitionswissenschaftliches Rahmenmodell zur Erklärung von Sequenzeffekten zu formulieren, ohne den damit verbundenen Anspruch der Allgemeingültigkeit aufzugeben. ACT erweist sich gegenüber anderen Architekturen (z.B. SOAR: Rosenbloom, Laird & Newell, 1993; 3CAPS: Just & Carpenter, 1992; EPIC: Meyer & Kieras, 1997, 1998) insofern überlegen, als dass sie sowohl eine integrative und formal präzise Beschreibung von kognitiven Zuständen sowie von Lern- und Problemlöseprozessen ermöglicht als auch für sich beansprucht, elementare Informationsverarbeitungsprozesse und komplexe, wissensbasierte Verarbeitungsprozesse psychologisch plausibel darzustellen. Sowohl Zustands- als auch Prozessbeschreibungen sind in ACT computational implementiert. Auf diese Implementierung wird jedoch an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da für den vorliegenden Zweck der Beschreibung von Mechanismen, die für die Entstehung von Sequenzeffekten bedeutsam sind, die integrative Funktion von ACT (gegenüber der exakten technischen Umsetzung) entscheidender ist.

3. Kognitionswissenschaftliche Analyse der Entstehung von Sequenzeffekten

Die im Folgenden vorgenommene kognitionswissenschaftliche Analyse zur Entstehung von Sequenzeffekten basiert auf der bereits eingeführten Vorstellung, dass Sequenzeffekte einerseits aus einem *Lernprozess bei der Aufgabenbearbeitung* und andererseits aus einem Prozess des *Transfers* der modifizierten Wissensstrukturen auf nachfolgende Aufgaben resultieren. Unterschiede hinsichtlich der Gesamtleistung zwischen verschiedenen Aufgabensequenzen sollten sich dann ergeben, wenn eine Aufgabensequenz im Vergleich zu einer anderen Sequenz (1) Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung in besonderer Weise fördert und/oder (2) wenn sie so beschaffen ist, dass ein Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben besonders gut möglich ist.

In Abschnitt 3.1 werden Annahmen zur Wissensrepräsentation, zum Lernen sowie zum Transfer beschrieben, wie sie in der kognitiven Architektur ACT-R 4.0 (Anderson & Lebiere, 1998) bzw. deren Vorgängerversionen ACT* (Anderson, 1983) sowie ACT-R 2.0 (Anderson, 1993) vertreten werden. ACT erhebt für sich den Anspruch, sowohl einen Rahmen für die Beschreibung, Erklärung und Vorhersage elementarer als aber auch aufwändiger und wissensbasierter kognitiver Prozesse zu bieten und erscheint daher für die Präzisierung der Annahmen zur Entstehung von Sequenzeffekten besonders geeignet. Ein Ergebnis der vorgenommenen Analyse ist, dass sich die spezifizierten Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung mit einigen Ausnahmen gut mit Hilfe architekturinhärenter Mechanismen beschreiben lassen, während sich hinsichtlich der Möglichkeit zur Beschreibung von Transferprozessen mit Hilfe von ACT deutliche Einschränkungen ergeben.

Ein Transfer auf der Basis prozeduraler Ähnlichkeit kann in ACT relativ erfolgreich dargestellt werden (vgl. Singley & Anderson, 1989). Dagegen stellen analoge Transferprozesse auf der Basis deklarativer Aufgabenrepräsentationen eine deutliche Herausforderung für die ACT-Theorie dar, da ACT das Vorhandensein prozedural repräsentierter Regeln zur Aufgabenbearbeitung voraussetzt. Analoges Transfer auf der Basis deklarativer Repräsentationen bildet jedoch eine wesentliche Komponente zur Erklärung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben und zwar vor allem dann, wenn Problemlöser noch nicht über eine hinreichende

Expertise in der Untersuchungsdomäne verfügen. Die in ACT getroffenen Annahmen zum analogen Transfer sind jedoch bislang entweder an der technischen Implementierung gescheitert, gelten für die Beschreibung menschlichen Verhaltens als unplausibel (vgl. das Modell von Anderson & Thompson, 1989), oder sie sind unvollständig, da sie bestimmte Teilprozesse wie die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgabenrepräsentationen als Voraussetzung für Transfer nicht spezifizieren und so nur einen kleinen Ausschnitt des mehrstufigen Transferprozesses berücksichtigen (vgl. das Modell von Salvucci & Anderson, 1998). Insbesondere mit dem letzten Punkt erweist sich ACT damit als ungeeignet, um vorherzusagen, unter welchen Bedingungen es überhaupt zu einem deklarativen Transfer kommt. Da Sequenzeffekte nach der hier vertretenen Konzeption zu einem wesentlichen Anteil auf Transfereffekten aufbauen, ist nur unter den Bedingungen, unter denen ein Wissenstransfer zu erwarten ist, auch mit Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben zu rechnen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis dieser Randbedingungen entscheidend, um Vorhersagen zum Auftreten von Sequenzeffekten treffen zu können.

Daher werden in Abschnitt 3.2 aufbauend auf der Literatur zum analogen Problemlösen ergänzend die Bedingungen beschrieben, die bei der Herstellung einer deklarativen Repräsentation der Aufgabe anhand des darin spezifizierten Ausgangs- und Zielzustandes, beim Erkennen von Ähnlichkeiten zwischen deklarativen Repräsentationen verschiedener Aufgaben und bei deren Nutzung für die Konstruktion einer Lösung bedeutsam sind. Diese Beschreibung orientiert sich dabei stark an den bereits in Abschnitt 2.2.1 eingeführten Theorien analogen Problemlösens bzw. Transfers der Arbeitsgruppe um Dedre Gentner einerseits (Clement & Gentner, 1991; Gentner, 1983; Gentner & Markman, 1994, 1997; Gentner et al., 1993) und der Arbeitsgruppe um Keith Holyoak andererseits (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Holyoak, 1985; Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1995, 1997).

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der in diesem Kapitel vorgenommenen kognitionswissenschaftlichen Analyse zur Entstehung von Sequenzeffekten auf der Basis der ACT-Architektur und der genannten Theorien zum analogen Transfer wird in Abschnitt 3.3 präsentiert. Das dort präsentierte integrative Rahmenmodell bildet den theoretischen Kern der vorliegenden Arbeit und wird genutzt, um Untersuchungshypothesen für die eigenen empirischen Studien abzuleiten.

3.1 Sequenzeffekte aus der Perspektive der kognitiven Architektur ACT

Die folgende Darstellung der kognitiven Architektur ACT beruht im Wesentlichen auf Annahmen, wie sie in der Version ACT-R 4.0 (Anderson & Lebiere, 1998) vertreten werden. Annahmen, die aus den Vorgängerversionen ACT* (Anderson, 1983) oder auch ACT-R 2.0 (Anderson, 1993) stammen, werden explizit als solche gekennzeichnet.

ACT basiert auf drei wesentlichen Unterscheidungen (Anderson & Schunn, 2000), die es ermöglichen, viele der bereits angesprochenen Konzepte (z.B. Aktivierung, prozedural repräsentiertes Wissen etc.) zu präzisieren:

- Erstens werden zwei verschiedene Langzeitgedächtnissysteme mit spezifischen Wissensarten unterschieden, nämlich deklaratives Wissen einerseits und prozedurales Wissen andererseits.
- Zweitens werden sowohl für das deklarative als auch für das prozedurale Gedächtnis eine diskrete, symbolische Ebene der Wissensrepräsentation von Inhalten sowie eine zusätzliche kontinuierliche, subsymbolische Ebene zur Repräsentation von Eigenschaften dieser Inhalte angenommen. Diese subsymbolische Ebene dient z.B. dazu, die unterschiedliche Verfügbarkeit symbolischer Wissensstrukturen zu repräsentieren.
- Drittens lassen sich die in ACT enthaltenen Annahmen danach unterscheiden, ob sie die Frage betreffen, wie Wissen erworben wird (Annahmen zum Lernen), oder ob sie sich darauf beziehen, wie und mit welchem Wissen eine bestimmte Aufgabe durch das System erledigt wird (Annahmen zur Performanz).

Diesen drei Unterscheidungen folgend kann Lernen bei der Aufgabenbearbeitung als Modifikation von entweder prozeduralen oder deklarativen Wissensinhalten sowohl auf einer symbolischen als auch auf einer subsymbolischen Ebene aufgefasst werden. Diese modifizierten Wissensstrukturen können dann im Sinne eines Transfers zur Bearbeitung nachfolgender Aufgaben herangezogen werden und gegebenenfalls zur Entstehung von Sequenzeffekten beitragen. Im Folgenden werden zunächst die auf der symbolischen und subsymbolischen Ebene definierten Eigenschaften der beiden Langzeitgedächtnissysteme von ACT dargestellt. Abschnitt 3.1.1 beinhaltet eine Beschreibung der in ACT angenommenen Lernmechanismen, und in Abschnitt 3.1.2 werden schließlich verschiedene Überlegungen zu Transfer in ACT skizziert.

Deklaratives Gedächtnis. Bei den Inhalten des deklarativen Gedächtnisses handelt es sich um Faktenwissen über konkrete Objekte und Sachverhalte, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass es prinzipiell bewusst zugänglich und damit verbalisierbar ist. Es wird angenommen, dass dieses Faktenwissen in Form so genannter *chunks* abgespeichert ist. Unter *chunks* werden typisierte Wissensseinheiten verstanden, mit deren Hilfe Informationen zu verschiedenen Merkmalsausprägungen eines Objekts oder Sachverhalts – festgelegt in so genannten *slots* – repräsentiert werden können. Die *slots* eines *chunks* repräsentieren bestimmte Attribute und können mit Standardwerten (*default values*) belegt sein, die im Falle einer konkreten Instantiierung durch konkrete Ausprägungen bzw. Attributwerte (*slot-filler*), bei denen es sich wiederum um *chunks* handelt, ersetzt werden. Aus dieser *slot-filler*-Relation zwischen *chunks* ergibt sich ein semantisches Netzwerk zwischen verschiedenen Wissensseinheiten. Beispielsweise kann Wissen über das Kaninchen ‚Hermine‘ in Form eines *chunks* abgelegt sein, wobei ein Teil dieses Wissens in Informationen über die Fellfarbe besteht. Dieses Wissen kann mit Hilfe des Attributs (*slot*) ‚Fellfarbe‘ repräsentiert werden, welches zum Beispiel den Attributwert ‚braun‘ annehmen kann (*slot-filler*). Jeder *chunk* enthält jedoch nicht nur Informationen über Attribute und deren Ausprägungen für eine konkrete Instanz, sondern es wird zusätzlich spezifiziert, von welchem Typ er ist, d.h. zu welcher übergeordneten, abstrakten Kategorie (*chunk-type*) er gehört (z.B. ‚Tier‘). Der *chunk-type* eines *chunks* legt fest, welche *slots* ein *chunk* dieses Typs enthält, da jeder *chunk* eines bestimmten *chunk-types* die gleichen *slots* enthält. Während *chunks* also konkrete Objekte und Sachverhalte repräsentieren, entsprechen *chunk-types* Konzepten oder Kategorien.

Kognitive Prozesse werden in ACT als zielgesteuert aufgefasst. Eine besondere Stellung im deklarativen Gedächtnis nehmen daher *goal chunks* ein, bei denen es sich um Repräsentationen der aktuellen oder noch zu erledigenden Verarbeitungsziele des Systems handelt. Diese Ziele (z.B. die Teilziele einer komplexen Aufgabe) sind in Form eines so genannten *goal stacks* organisiert, wobei nur jeweils das oberste Ziel die aktuelle Informationsverarbeitung steuern kann. Diese Handlungssteuerung durch das oberste Ziel ergibt sich aus zwei Mechanismen: Erstens dienen die *slot-filler* des obersten Ziels als Aktivationsquelle für andere *chunks* (vgl. Erläuterungen zu ‚Kontextaktivierung‘ im nächsten Absatz), und zweitens legt das aktuelle Ziel fest, welche Produktionsregeln im nächsten Schritt zur Ausführung gelangen

können (vgl. die Erläuterungen zu ‚*pattern matching*‘ im Abschnitt über das prozedurale Gedächtnis).

Subsymbolische Parameter des deklarativen Gedächtnisses umfassen die Aktivierung eines *chunks* sowie die Assoziationsstärke zwischen verschiedenen *chunks*. Die Aktivierung eines *chunks* bestimmt, ob und wie schnell dieser *chunk* aus dem deklarativen Gedächtnis abgerufen werden kann. Stehen bei der Anwendung prozeduralen Wissens (siehe unten) mehrere *chunks* für die Instantiierung einer Produktionsregel zur Verfügung, so wird derjenige *chunk* gebunden, welcher über die höchste Aktivierung verfügt. Die Aktivierung eines *chunks* ergibt sich einerseits aus seiner Basisaktivierung, die – unabhängig vom aktuellen Kontext – auf der Grundlage der Abrufhäufigkeit (*frequency*) und des seit dem letzten Abruf dieses *chunks* aus dem Gedächtnis verstrichenen Zeitraums (*recency*) – die allgemeine Nützlichkeit eines *chunks* repräsentiert. Andererseits erhält ein *chunk* eine so genannte Kontextaktivierung vom aktuell handlungsleitenden Ziel bzw. von dessen *slot-fillers*, wenn er im Kontext dieses Ziels zur Zielerreichung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit benötigt wird. Bei der Bestimmung der Kontextaktivierung wird davon ausgegangen, dass es eine fixe Menge an so genannter Quellaktivierung (*source activation*) gibt, die sich gleichmäßig auf die *slot-fillers* des aktuell verarbeitungssteuernden Ziels verteilt und von diesen als Kontextaktivierung an andere *chunks* weiter gegeben werden kann.

Ob bzw. wie viel Kontextaktivierung ein *chunk i* über diesen so genannten *spreading activation*-Mechanismus von einem *slot-filler j* des *goal chunks* erhält, hängt von seiner Assoziationsstärke zu diesem *slot-filler* des *goal chunks* ab (s_{ji}). Diese schätzt die bedingte Wahrscheinlichkeit, mit der der *chunk i* für die Zielerreichung benötigt wird, wenn *chunk j* *slot-filler* des aktuellen Ziels ist.

Prozedurales Gedächtnis. Im Unterschied zum deklarativen Gedächtnis sind im prozeduralen Gedächtnis atomare Fertigkeiten repräsentiert, die im Gegensatz zu deklarativen Inhalten nicht verbalisierbar sind und deren Vorhandensein sich nur im Verhalten ausdrückt. Fertigkeiten sind als Produktionsregeln repräsentiert, die aus zwei Komponenten bestehen – einer Bedingungskomponente (*if*-Teil), in der die Anwendungsbedingungen der Produktionsregel spezifiziert werden sowie einer Ausführungskomponente (*then*-Teil), in der Aktionen beschrieben werden.

Damit eine Produktionsregel ausgeführt werden kann, muss die in ihrem *if*-Teil enthaltene Zielspezifikation mit dem aktuellen Handlungsziel übereinstimmen. Liegen

für die Bearbeitung einer Aufgabe mehrere Produktionsregeln mit der gleichen Zielspezifikation vor, bilden diese das so genannte *conflict resolution set*. Zur Auflösung dieses Konflikts zwischen mehreren Produktionsregeln (*conflict resolution*) wird diejenige Regel aus dem Set ausgewählt, die durch den höchsten Netto-Nutzen im Hinblick auf die Zielerreichung (*expected gain*, siehe unten) gekennzeichnet ist. Erst im Anschluss wird überprüft, ob die weiteren Bedingungskomponenten der ausgewählten Produktionsregel erfüllt sind, d.h. ob die Anwendungsbedingungen durch im deklarativen Gedächtnis vorhandene *chunks* instantiiert werden können. Dies ist nur möglich, wenn diese *chunks* hinreichend, d.h. über einem bestimmten Schwellenwert (*retrieval threshold*), aktiviert sind. Dieser Ablauf – Auffinden einer oder mehrerer Produktionsregel(n) mit einer dem aktuellen Handlungsziel entsprechenden Zielspezifikation, gegebenenfalls Auswahl derjenigen Produktionsregel mit dem höchsten Netto-Nutzen für die Zielerreichung und Instantiierung der Produktionsregel mit deklarativen Wissensseinheiten – wird als *pattern matching* Zyklus bezeichnet. Mit deklarativem Wissen instantiierte atomare Produktionen sind für sämtliche Aktivitäten des Systems wie z.B. für die Bearbeitung komplexer Aufgaben verantwortlich.

Auf der subsymbolischen Ebene sind Produktionsregeln durch ihren Nettonutzen (*expected gain E*), den sie für die Erreichung des aktuell handlungsleitenden Ziels haben, und durch ihre Produktionsstärke gekennzeichnet. Der für die *conflict resolution* entscheidende Nettonutzen besteht in der Differenz zwischen dem absoluten Nutzen der Produktionsregel für die Zielerreichung (entspricht der Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung multipliziert mit dem Wert des Ziels) und den durch ihren Einsatz entstehenden Kosten, ausgedrückt durch den geschätzten Zeitbedarf bei der Ausführung.

Zusätzlich zum Nettonutzen besitzt jede Produktionsregel eine Produktionsstärke, die bestimmt, wie viel Zeit zur Instantiierung einer Produktionsregel benötigt wird. Sie hängt wie die Basisaktivierung von *chunks* von der Häufigkeit des Einsatzes und der seit der letzten Nutzung verstrichenen Zeitspanne ab. Das Konzept der Produktionsstärke wird unter anderem genutzt, um eine Verbesserung kognitiver Leistungen durch intensives Üben einer bestimmten Fertigkeit in ACT abzubilden (vgl. *power law of practice*, Anderson & Fincham, 1994; Fitts & Posner, 1967; Logan, 1988; Newell & Rosenbloom, 1981).

Zusammenfassung. Der aktuelle Zustand eines kognitiven Systems kann im Rahmen der ACT-Architektur durch eine bestimmte Konfiguration deklarativer und prozeduraler symbolischer Wissensrepräsentationen und deren entsprechenden subsymbolischen Parametern (z.B. Aktivations- und Stärkewerten) dargestellt werden. Veränderungen im Zustand dieses kognitiven Systems, die z.B. für Sequenzeffekte verantwortlich sind, werden mit dem Begriff des Lernens bzw. Wissenserwerbs bezeichnet.

3.1.1 Lernen in Act

Anderson und Lebiere (1998) verwenden im Sinne der ACT-Architektur ein zweidimensionales Klassifikationsschema, um Annahmen zu verschiedenen Lernprozessen einzuordnen:

One dimension is whether the assumptions are concerned with the acquisition of procedural knowledge or whether they are concerned with the acquisition of declarative knowledge. The other dimension is whether they are concerned with symbolic learning (the acquisition of the chunks and productions themselves) or whether they are concerned with subsymbolic learning (the acquisition of the parameters that govern the deployment of these knowledge elements.

(Anderson & Lebiere, 1998, S. 101)

Entsprechend der Architekturannahmen ist sowohl der Erwerb prozeduraler als auch deklarativer symbolischer Wissensstrukturen das Resultat eines „*all-or-none*“-Lernprozesses, während auf der subsymbolischen Ebene die kontinuierliche Veränderung dieses Wissens mit zunehmender Erfahrung ausgedrückt wird (Anderson & Schunn, 2000).

Wissenserwerb im deklarativen Gedächtnis – symbolische Ebene. Der Erwerb neuer deklarativer Wissenseinheiten (*chunks*) findet entweder direkt durch die Enkodierung entsprechender Information aus der Umwelt statt oder geschieht durch die Ausführung von Produktionsregeln, in deren Aktionsteil das Generieren eines neuen Handlungsziels (*goal chunk*) vorgesehen ist. Dieser *goal chunk* wird im Anschluss an die erfolgreiche Ausführung der Produktionsregel dem deklarativen Gedächtnis als *chunk* hinzugefügt. Diese Art des Lernens wird auch als aktiv bzw. konstruktiv

gekennzeichnet, um sie von der passiven Enkodierung von Information abzugrenzen (Anderson & Schunn, 2000).

Während der beschriebene Mechanismus den Erwerb von Faktenwissen über konkrete Objekte oder Sachverhalte beschreiben kann, bleibt unklar, wie in ACT *chunk-types* erworben werden, d.h. Wissen bezüglich übergeordneter abstrakter Kategorien oder Konzepte. Der Erwerb dieses Wissens setzt einen Abstraktionsprozess voraus, bei dem hinsichtlich der Oberflächenmerkmale variierende, deklarativ repräsentierte Instanzen einer Kategorie miteinander verglichen werden, um die (strukturellen) Gemeinsamkeiten dieser Instanzen zu extrahieren. Diese Vergleiche deklarativer Repräsentationen und die Identifikation struktureller Gemeinsamkeiten bilden z.B. die Grundlage für die Nutzung von Analogie als Problemlöse/Transfer- oder aber auch als Lernmechanismus z.B. beim Erwerb von Aufgabenschemata (vgl. Abschnitt 2.2; Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1997; Ross & Kennedy, 1990).

Die Tatsache, dass in ACT entsprechende Mechanismen zur Umsetzung dieser Prozesse fehlen, liefert erste Hinweise, dass die Architektur trotz ihres anders gearteten Anspruchs zur Beschreibung dieser auf deklarativem Wissen beruhenden Problemlöse- und Lernmechanismen möglicherweise weniger gut geeignet ist.

Wissenserwerb im deklarativen Gedächtnis – subsymbolische Ebene. Auf der subsymbolischen Ebene des deklarativen Gedächtnisses beziehen sich Lernprozesse auf die Modifikation der Basisaktivierung von *chunks* und der Verbindungsstärke zwischen ihnen. Die Basisaktivierung nimmt mit einem häufigeren Gebrauch von *chunks* und einem kürzeren Zeitintervall seit ihrer letzten Nutzung zu. Neben dieser allgemeinen Nützlichkeit eines *chunks* kann auch gelernt werden, wie eng verschiedene deklarative Wissensseinheiten miteinander zusammenhängen, d.h. wie hoch die Nutzungswahrscheinlichkeit eines bestimmten *chunks* dann ist, wenn ein bestimmter anderer *chunk* ein *slot-filler* des aktuellen Ziels ist. Dieser Lernprozess wird in ACT-R dadurch realisiert, dass die Assoziationsstärke zwischen solchen *chunks* zunimmt, die häufig im gleichen Kontext miteinander verwendet werden.

Wissenserwerb im prozeduralen Gedächtnis – symbolische Ebene. Im Verlauf der Entwicklung der ACT-Architektur wurden besonders im Bereich prozeduraler Lernmechanismen umfangreiche theoretische Veränderungen vorgenommen. In ACT* (Anderson, 1983) waren mehrere prozedurale Lernmechanismen integriert, die

auch von Autoren außerhalb der „*ACT community*“ postuliert und bis zum heutigen Zeitpunkt als zentrale Eigenschaften des Fertigkeitserwerbs angesehen werden (z.B. VanLehn, 1989). Diese Mechanismen werden daher im Folgenden beschrieben, obwohl sie in ACT-R – teilweise wegen technischer Schwierigkeiten bei ihrer konkreten Implementierung in der aktuellen Architekturversion – nicht mehr enthalten sind. Ebenso wird auf ein Prozessmodell zum Fertigkeitserwerb (Anderson et al., 1997) eingegangen, welches auf der 1993 beschriebenen Version von ACT-R (Version 2.0; Anderson, 1993) beruht. Diese Version 2.0 unterscheidet sich insofern sehr stark von ACT-R 4.0, als dass in ihr ein Analogiemechanismus enthalten ist, welcher einen zentralen Bestandteil des Prozessmodells zum Fertigkeitserwerb bildet. Die Tatsache, dass dieser Analogiemechanismus in ACT-R 4.0 nicht mehr enthalten ist, hat entscheidende Konsequenzen im Hinblick auf die Eignung von ACT zur Beschreibung der Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben.

In ACT-R 4.0 (Anderson & Lebiere, 1998) wird davon ausgegangen, dass der einzige prozedurale, symbolische Lernmechanismus in der so genannten Produktionskompilierung besteht. Die Grundidee ist dabei, dass Regelwissen, welches z.B. zur Lösung einer Aufgabe benötigt wird, zunächst deliberativ enkodiert werden muss, indem eine deklarative Repräsentation angelegt wird, und dass es erst im Anschluss zur Bildung einer Produktion kommt. Für die Produktionskompilierung ist die deklarative Repräsentation einer einzigen Aufgabenlösung hinreichend. Dabei wird zunächst eine explizit für prozedurales Lernen verantwortliche Produktion (*study-dependency*) aufgerufen, deren erfolgreiche Ausführung im Anlegen deklarativer Repräsentationen von atomaren Fertigkeiten in Form so genannter *dependency chunks* resultiert. Zusätzlich werden diese deklarativen Repräsentationen in prozedurale Repräsentationen transformiert (Trafton & Reiser, 1993).

Mit diesem Kompilierungsmechanismus, der in der 1998 publizierten Version von ACT-R (Version 4.0; Anderson & Lebiere, 1998) implementiert ist, distanzieren sich Anderson und Mitarbeiter von einer Auffassung, wie sie sie noch in dem ein Jahr zuvor publizierten Prozessmodell zum Erwerb komplexer kognitiver Fertigkeiten (Anderson et al., 1997) vertreten haben. Dieses Modell beruht auf der ACT-R Version 2.0 (Anderson, 1993) und versucht, der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich der Fertigkeitserwerb in der Regel über einen längeren Zeitraum erstreckt und dass dabei verschiedene, qualitativ unterschiedliche Stufen durchlaufen werden. Die zentrale

Annahme dieses Modells besteht darin, dass der Erwerb prozedural repräsentierter Fertigkeiten per Analogieschluss erfolgt, d.h. unter Rückbezug auf frühere Problemlöseerfahrungen bei der eigenständigen Bearbeitung von Aufgaben bzw. auf ausgearbeitete Beispiellösungen.

- In einer ersten Stufe des Fertigkeitserwerbs werden nach diesem Modell zunächst deklarative Repräsentationen von eigenständig generierten Aufgabenlösungen oder von ausgearbeiteten Beispiellösungen angelegt. Diese werden aktiviert und genutzt, um Lösungen für eine analoge Aufgabe zu konstruieren. Dabei werden solche deklarativen Repräsentationen als Analogien ausgewählt, die im Kontext des gleichen Ziels erstellt wurden, welches auch für die aktuelle Aufgabe die Handlungsausführung steuert. Eine Folge dieser Annahme ist es, dass die Repräsentation der Zielsetzung einer Aufgabenstellung in zentraler Weise beeinflusst, auf welche frühere Problemlöseerfahrung in dieser ersten Stufe des Fertigkeitserwerbs zurückgegriffen wird (Anderson & Schunn, 2000).
- In der zweiten Phase werden allgemeine Regeln zur Aufgabenlösung auf Basis analoger deklarativer Aufgabenrepräsentationen abstrahiert. Diese Regeln sind als deklarative Beschreibungen abgebildet.
- In der dritten Stufe des Prozessmodells werden diese Regeln prozeduralisiert und als Produktionsregeln bei der Aufgabenbearbeitung eingesetzt.
- Für die vierte und letzte Stufe wird angenommen, dass es bei der Bearbeitung von Aufgaben erneut zu einem Rückgriff auf konkrete deklarative Repräsentationen kommt, allerdings mit einem wesentlichen Unterschied im Vergleich zu Stufe 1. Aufgabenlösungen werden nicht auf der Basis analoger Aufgabenlösungen konstruiert, sondern die zentrale Annahme ist, dass ein Problemlöser in dieser vierten Stufe des Fertigkeitserwerbs über so viele konkrete Problemlöseerfahrungen verfügt, dass er passende Lösungen für Aufgaben direkt aus dem Gedächtnis abrufen kann, ohne domänenspezifische Prozeduren überhaupt anwenden zu müssen.

Nach diesem vierstufigen Modell wird der Erwerb kognitiver Fertigkeiten als komplexe Interaktion deklarativer und prozeduraler Lernmechanismen beschrieben. Das Prozessmodell wird außerhalb der „*ACT community*“ als Rahmenmodell genutzt, um Prozesse beim Lernen aus Beispielen zu beschreiben (Atkinson et al., 2000). Aus Perspektive von ACT-R Version 4.0 widerspricht der im Modell enthaltene Analogie-

mechanismus jedoch der dort vertretenen generellen Philosophie einer atomaren Wissensrepräsentation, da in seiner Anwendung sehr komplexe Produktionsregeln angelegt werden. Auf diese und andere Schwierigkeiten wird bei der Übersicht über (analoge) Transfermechanismen in ACT (Abschnitt 3.1.2) noch einmal eingegangen.

In ACT* (Anderson, 1983) waren vier verschiedene symbolische Lernmechanismen auf prozeduraler Ebene vorgesehen – Diskrimination, Generalisierung, Prozeduralisierung und Komposition. Diese Mechanismen zeichnen sich gegenüber den in ACT-R 2.0 und 4.0 enthaltenen Lernmechanismen vor allem dadurch aus, dass sie Möglichkeiten der Modifikation hinsichtlich der symbolischen Repräsentationen bereits vorhandener Fertigkeiten beinhalten. So wurde in ACT* postuliert, dass sich die Notwendigkeit zum so genannten *tuning* einer Produktionsregel (Anderson, 1982) ergibt, wenn die Anwendung einer bereits vorhandenen Regel auf Grund zu allgemein oder aber zu restriktiv gefasster Anwendungsbedingungen fehlschlägt. In diesen Fällen wurde angenommen, dass die ursprüngliche Produktionsregel dahingehend modifiziert wird, dass ihr Bedingungsteil entweder weiter spezifiziert (*discrimination*) oder ausgeweitet wird (*generalization*).

Von einer Prozeduralisierung der Produktion wurde ausgegangen, wenn diese häufig auf gleiche Weise, d.h. unter Verwendung der gleichen *chunks*, instantiiert wurde. In diesem Fall wurde angenommen, dass eine alternative Produktionsregel angelegt wird, die die in den *chunks* enthaltene Information enthält, so dass keine weitere Information aus dem deklarativen Gedächtnis abgerufen werden muss.

Eine weitere, in ACT-R nicht mehr enthaltene Möglichkeit des prozeduralen Lernens auf symbolischer Ebene bezieht sich auf die Produktionskomposition bzw. die Bildung so genannter Makrooperatoren (Anderson, 1982; 1983; Anderson, Farrell & Sauer, 1984; Koedinger & Anderson, 1990), wobei mehrere Produktionsregeln zu einer neuen Regel zusammengefasst werden. VanLehn (1989) bezeichnet diesen Lernmechanismus in Anlehnung an Fikes, Hart und Nilsson (1972) auch als *compounding*. Der Mechanismus der Produktionskomposition wurde unter anderem erfolgreich eingesetzt, um schemabasiertes Problemlösen (vgl. Abschnitt 2.2.1) bei der Bearbeitung von Geometrieaufgaben zu beschreiben (Koedinger & Anderson, 1990). Hierzu wurde ein Makrooperator eingesetzt, in dessen einzelnen Bedingungskomponenten jeweils das Vorliegen der – ein bestimmtes Schema ausmachenden – Strukturmerkmale überprüft wurde. Im Aktionsteil des Makrooperators wurde die zu diesem Schema dazugehörige, mehrschrittige Lösungsprozedur beschrieben. Koed-

inger und Anderson (1990, S. 544) charakterisieren einen Makrooperator zur Umsetzung eines spezifischen Aufgabenschemas wie folgt: „This schema can be represented as six production rules whose left-hand sides correspond to the six ways-to-prove of the schema, and whose right-hand sides contain five actions corresponding with the five part-statements of the schema.”

Ähnlich wie der in ACT-R Version 2.0 (Anderson, 1993) enthaltene Analogiemechanismus widerspricht auch die Produktionskomposition der atomaren Repräsentation von Fertigkeiten, wie sie in ACT-R 4.0 (Anderson & Lebiere, 1998) vertreten wird. Anderson und Lebiere (1998) argumentieren außerdem damit, dass es insgesamt zu wenig direkte Evidenz für sämtliche in ACT* angenommenen prozeduralen Lernmechanismen gegeben habe und man sie daher in den nachfolgenden Versionen nicht weiter implementiert habe. Insbesondere der Verzicht auf einen architekturinhärenten Analogiemechanismus hat jedoch entscheidende (negative) Konsequenzen dafür, mit ACT eine Präzisierung des Rahmenmodells für die Entstehung von Sequenzeffekten erreichen zu können.

Wissenserwerb im prozeduralen Gedächtnis – subsymbolische Ebene. Parameterveränderungen durch Lernprozesse im prozeduralen Gedächtnis beziehen sich in ACT auf zwei Größen, die Produktionsstärke und den Nettonutzen (*expected gain*) einzelner Produktionsregeln. Intensive Übung einer Fertigkeit führt zu einem geringen Zeitbedarf für die Ausführung dieser Fertigkeit (vgl. *power law of practice*, Anderson & Fincham, 1994; Fitts & Posner, 1967; Logan, 1988; Newell & Rosenbloom, 1981), welcher über einen Anstieg der Produktionsstärke der entsprechenden Produktionsregel erklärt wird. Lernen kann sich schließlich auch auf den *expected gain* einer Produktion beziehen, welcher bestimmt, ob eine Produktion im Konfliktresolutionsprozess zur Ausführung ausgewählt wird. In die Berechnung des *expected gain* gehen verschiedene Parameter ein, die sich auf den Erfolg bzw. Misserfolg sowie auf die Kosten vorangegangener Anwendungsversuche der betrachteten Produktionsregel beziehen. Diese Parameter unterliegen einer erfahrungsabhängigen Dynamik, die zur Modellierung von Lernfortschritten eingesetzt wird.

Fazit: Lernmechanismen in ACT und Sequenzeffekte

Zusammenfassend kann Lernen im Rahmen der kognitiven Architektur ACT als Neuerwerb deklarativer oder prozeduraler Wissensseinheiten sowie als Modifikation der

Werte für die subsymbolischen Parameter bereits bestehender Wissenseinheiten beschrieben werden. Damit ist die Architektur zunächst einmal grundsätzlich geeignet, verschiedene Lernmechanismen darzustellen, die eine wichtige Rolle für die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer wie voraussetzungsreicher Aufgaben spielen. Im Folgenden soll dargestellt werden, wie die verschiedenen Erklärungsansätze zur Entstehung von Sequenzeffekten bei den verschiedenen Aufgabenklassen (elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben, Induktionsaufgaben, Transformationsaufgaben, voraussetzungsreiche Aufgaben) im Hinblick auf Lernen bei der Aufgabenbearbeitung mit den in ACT spezifizierten Lernmechanismen in Einklang gebracht werden können. Da sich aus den bei voraussetzungsarmen Aufgaben identifizierten Lernprozessen Auswirkungen auf nachfolgende Aufgaben im Sinne eines Transfers überwiegend automatisch als Konsequenz ergeben, werden diese Auswirkungen für voraussetzungsarme Aufgaben an dieser Stelle mit beschrieben.

Für *elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben* konnte im Rahmen des Taskshift-Paradigmas gezeigt werden, dass Bearbeitungssequenzen, bei denen Aufgaben gleichen Typs (d.h. strukturidentische Aufgaben) aufeinander folgen, in besseren Leistungen resultieren als alternierende Sequenzen, bei denen Aufgaben unterschiedlichen Typs abwechselnd bearbeitet werden müssen (z.B. Jersild, 1927; Spector & Biederman, 1976). Erklärt werden diese Wechselkosten damit, dass Wissen, welches für die Bearbeitung einer Aufgabe benötigt wird, zusätzliche Aktivierung erfährt. Diese Aktivierungserhöhung kann sich im Fall geblockter Aufgabensequenzen positiv auf die anschließende Bearbeitung von Aufgaben des gleichen Typs auswirken. Bei alternierender Aufgabenbearbeitung kommt es dagegen zu Leistungseinbußen, entweder weil dieses aktivierte Wissen passiv mit der anschließenden Bearbeitung von Aufgaben eines anderen Typs interferiert (Allport et al., 1994) oder weil aktive Umkonfigurationsprozesse (Rogers & Monsell, 1995) notwendig werden, um das System auf den neuen Aufgabentyp einzustellen (z.B. gezielte Inhibition nicht benötigter, aktivierter Elemente, vgl. Mayr & Keele, 2000; Miyake et al., 2000; Li et al., 2000).

Lernen bei der Aufgabenbearbeitung als ein für Sequenzeffekte verantwortlicher Prozess besteht bei elementaren Reiz-Reaktions-Aufgaben also in einer zunehmenden Verfügbarkeit von zur Aufgabenbearbeitung benötigten Repräsentationen. Dieser Auffassung entsprechend modellieren Sohn und Anderson (2001) die Entstehung

von Wechselkosten in ACT-R über eine Zunahme der Aktivierung zur Aufgabebearbeitung benötigter *chunks*, die sich – je nachdem, ob es sich um eine geblockte oder eine alternierende Aufgabensequenz handelt – positiv oder leistungshemmend auf die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben auswirkt. Eine auf diesem Aktivationsparameter definierte Verfallsrate (*decay of activation*) wird genutzt, um die Reduktion der Wechselkosten mit zunehmendem Reaktions-Stimulus-Intervall darzustellen (vgl. De Jong et al., 1999; Meiran, 1996; Rogers & Monsell, 1995). Darüber hinaus regeln spezifische Produktionen die Vorbereitung des kognitiven Systems auf einen Aufgabenwechsel. Die Ausführung dieser Produktionsregeln ist ihrerseits mit einem bestimmten Zeitbedarf verbunden und trägt so ebenfalls zur Entstehung von Wechselkosten in Form von Vorbereitungskosten bei. Im Rahmen des Taskshift-Paradigmas nachgewiesene Sequenzeffekte lassen sich somit gut in ACT-R abbilden.

Für die Bearbeitung von *Induktionsaufgaben* bestehen Sequenzeffekte dahingehend, dass Sequenzen, deren Aufgaben entsprechend ihrer Komplexität aufsteigend und nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit geblockt angeordnet sind, zu besseren Leistungen führen, als solche Aufgabenabfolgen, bei denen dies nicht der Fall ist (Sweller, 1976, 1980a, b; Sweller & Gee, 1978). Diese Sequenzeffekte werden zurückgeführt auf Suchprozesse, die sich in einem Hypothesenraum abspielen, in dem mögliche Regeln unterschiedlicher Salienz repräsentiert sind. Die Art und Anzahl bereits bearbeiteter Aufgaben verändert diesen Hypothesenraum bzw. die Salienz der darin enthaltenen Hypothesen und bestimmt so, welche Hypothesen bei nachfolgenden Aufgaben bevorzugt getestet werden (Glassman & Levine, 1972; Levine, 1975).

In ACT kann Lernen bei der Bearbeitung von Induktionsaufgaben beschrieben werden, indem angenommen wird, dass zunächst bei der Bearbeitung einer Aufgabe über den Mechanismus der Produktionskompilierung eine Produktionsregel generiert wird, die hinreichend abstrakt formuliert ist, um auch auf nachfolgende Aufgaben angewendet werden zu können. Die wiederholte Anwendung dieser Produktion auf strukturähnliche Aufgaben führt zu einer zunehmenden Verfügbarkeit dieser Produktion, welches in ACT beispielsweise durch einen Anstieg ihres Nettonutzens (*expected gain*) auf Grund erfolgreicher Anwendung realisiert werden könnte. Damit können sich andere Produktionsregeln mit gleicher Zielspezifikation im Konfliktresolutionsprozess kaum noch gegenüber dieser mit einem hohen Nettonutzen versehenen Produktionsregel durchsetzen. Als Konsequenz sind strukturell unähnliche Kriteriums-aufgaben, für deren Bearbeitung diese anderen Produktionsregeln benötigt wer-

den, nicht mehr lösbar. Voraussetzung für dieses beschriebene Szenario ist jedoch, dass sämtliche für die verschiedenen Aufgaben benötigten Produktionsregeln die gleiche Zielspezifikation enthalten, damit es zu einem Konflikt zwischen alternativen Produktionsregeln kommen kann, in dem sich die dominante, aber bei strukturell unähnlichen Aufgaben ungeeignete Produktionsregel durchsetzen kann.

Während Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit auf diese Weise relativ gut darstellbar sind, lässt sich in ACT dagegen eher schlecht abbilden, warum sich Sequenzeffekte zu Gunsten einer in der Komplexität zunehmenden Aufgabensequenz ergeben. Eine der Annahmen von ACT besteht darin, dass es sich bei einzelnen Produktionsregeln um atomare Wissensseinheiten handelt, die unabhängig voneinander erworben und angewendet werden. „Specifically, the time or likelihood of a production firing should not depend on where it appears either within a particular problem or across problems“ (Singley & Anderson, 1989, S. 58). Damit sind Regeln zur Bearbeitung komplexer Aufgaben in ACT nicht leichter erwerbbar, wenn sie am Ende einer Sequenz zunehmend komplexer Aufgaben eingesetzt werden müssen. Zur Modellierung komplexitätsabhängiger Sequenzeffekte ergeben sich daher möglicherweise gewisse Einschränkungen bezüglich der Eignung von ACT.

Für *Transformationsaufgaben* bestehen Sequenzeffekte vor allem im Einstellungseffekt (Luchins, 1942; Luchins & Luchins, 1959; Sweller & Gee, 1978), der sich auch für Induktionsaufgaben nachweisen lässt. Werden nach der Bearbeitung einer Menge von Aufgaben, die alle unter Anwendung der gleichen Regeln lösbar sind, Aufgaben dargeboten, für deren Lösung sinnvollerweise andere Regeln zur Anwendung kommen sollten, werden diese letzten Aufgaben schlechter bearbeitet, als wenn sie am Anfang der Aufgabensequenz präsentiert werden. Für diesen Effekt existiert eine auf ACT* (Anderson, 1983) basierende bereits beschriebene Erklärung (Spies & Hesse, 1987), die auf dem in dieser Architekturversion noch implementierten prozeduralen Lernmechanismus der Produktionskomposition sowie auf einer Erhöhung des Stärkewertes von Produktionen bei häufiger Anwendung beruht. Auch in der neueren ACT-R Version (Anderson & Lebiere, 1998) lassen sich Einstellungseffekte – unter Verzicht auf die Produktionskomposition – modellieren. Dabei kann auf die bereits für Induktionsaufgaben beschriebenen Mechanismen zurückgegriffen werden (Anstieg des *expected gain* einer Produktionsregel bei wiederholter Bearbei-

tung strukturell identischer Aufgaben; Konfliktresolution zu Gunsten dieser bei der Bearbeitung strukturell unähnlicher Aufgaben ungeeigneten Produktion).

Für *voraussetzungsreiche Aufgaben* wurde angenommen, dass Lernen bei der Aufgabenbearbeitung – als eine neben Transferprozessen wesentliche Voraussetzung für die Entstehung von Sequenzeffekten – zunächst durch die Art des für die Aufgabenbearbeitung zur Verfügung stehenden Vorwissens moderiert wird. Verfügenden Problemlöser über hinreichend Expertise in einer Domäne, können Aufgaben schemabasiert bearbeitet werden. Lernen bei der schemabasierten Aufgabenbearbeitung besteht dann vor allem darin, dass die eingesetzten Schemata weiter automatisiert werden. Koedinger und Anderson (1990) beschreiben ein schemabasiertes Vorgehen zur Bearbeitung von Geometrieaufgaben auf der Basis von ACT* (Anderson, 1983). Auch wenn die dort gewählte Vorgehensweise auf der Verwendung der in ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) nicht mehr implementierten Makrooperatoren beruht, ist vorstellbar, dass schemabasiertes Problemlösen auch über den Einsatz einzelner Produktionsregeln realisiert werden kann. Lernprozesse bei der schemabasierten Aufgabenbearbeitung bestehen dann entsprechend in der oben beschriebenen subsymbolischen Veränderung der ein Schema ausmachenden Produktionsregeln.

Bearbeitungsprozesse, die auf der Basis von abstraktem Vorwissen operieren, sind in ACT-R gut darstellbar, da sie immer regelbasiert – auf der Basis von Produktionsregeln – implementiert werden können. Dagegen ist die Beschreibung von analogen Problemlöse- und von Lernmechanismen für den Fall, dass Vorwissen lediglich in Form von Fallwissen vorliegt, in ACT-R nur sehr eingeschränkt möglich. Fallwissen „entzieht sich gerade der Kodifizierung in Regeln und erlaubt neue, kreative Anwendung durch Hervorhebung immer anderer, bislang unbeachteter Aspekte eines Falls, durch Erinnerung an ihn aus einer neuen Perspektive“ (Strube & Janetzko, 1990, S. 212). Verfügt ein Problemlöser nur über Kenntnisse bezüglich einzelner Problemlöseepisoden in einer Domäne, ist er darauf angewiesen, neue Aufgaben analog zu diesen bereits gelösten Aufgaben zu bearbeiten. Analoges Problemlösen kann seinerseits dazu führen, dass durch die Bearbeitung einer neuen Aufgabe weiteres Fallwissen generiert wird, oder – wenn bereits mehrere Repräsentationen strukturell identischer Aufgaben und ihrer Lösungen vorliegen – dass ein abstraktes Aufgabenschema induziert wird, bei dem über die oberflächlichen Unterschiede der Repräsentationen hinweg die strukturellen Gemeinsamkeiten festgestellt werden. Um sowohl

diese analogen Problemlöse- als auch die Lernprozesse adäquat in einer kognitiven Architektur abbilden zu können, müssen Mechanismen vorhanden sein, die auf der Basis deklarativer Wissensrepräsentationen operieren und die z.B. Vergleiche zwischen deklarativen Repräsentationen verschiedener (gelöster und ungelöster) Aufgaben sowie Interpretations- und Abstraktionsprozesse ermöglichen. Lernmechanismen, die den induktiven Erwerb abstrakter Inhalte wie z.B. von Konzepten und Kategorien ermöglichen, sind jedoch in der aktuellen Version von ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) nicht implementiert, obwohl gleichzeitig angenommen wird, dass solche abstrakten Wissensstrukturen existieren (vgl. 'Erwerb von *chunk-types*').

Diese bislang fehlenden Mechanismen könnten dabei durch Produktionsregeln repräsentiert werden. Vorstellbar sind beispielsweise – in ACT* (Anderson, 1983) noch enthaltene – allgemeine Interpretations- und Abstraktionsregeln, mit deren Hilfe deklaratives Wissen weiter verarbeitet werden kann, um es z.B. einer Aufgabenbearbeitung zuzuführen. Letztlich müsste die Interpretation und Abstraktion deklarativen Wissens dabei im Erwerb neuer Produktionsregeln münden, die zur Aufgabenbearbeitung eingesetzt werden können (vgl. Analogiemechanismus in ACT-R 2.0). Gefordert wird also keineswegs, die Architektur dahingehend zu erweitern, dass deklaratives Wissen direkt – ohne den „Umweg“ über die prozedurale Ebene – zur Aufgabenbearbeitung eingesetzt werden kann. Es erscheint allerdings sinnvoll, stärker als bisher der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich Problemlösemethoden dahingehend unterscheiden können, ob das zur Lösung benötigte Wissen primär im deklarativen Gedächtnis repräsentiert ist und daher erst prozeduralisiert werden muss, damit es einer Aufgabenbearbeitung zugeführt werden kann, oder ob es bereits in Form von Produktionsregeln vorliegt.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass man zwar auch in der aktuellen Architekturversion Produktionsregeln für die Modellierung komplexer Analogie-Phänomene formulieren kann, wenn sie zur Wiedergabe der Daten oder theoretischen Annahmen benötigt werden. Bei diesen Produktionsregeln handelt es sich dann aber nicht um Umsetzungen architekturinhärenter Mechanismen (wie z.B. *pattern matching*, *conflict resolution*), sondern um Ergänzungen im Rahmen einer konkreten Modellierung, die nur für diese Modellierung gelten. Wünschenswert wäre allerdings die Formulierung eines architekturinhärenten Mechanismus für die analoge Verarbeitung deklarativer Repräsentationen, um der Tatsache gerecht zu werden,

dass Analogie in einer Vielzahl kognitiver Anforderungen (schlussfolgerndes Denken, Problemlösen, Kategorisieren und Beurteilen etc.) bedeutsam ist.

Diese Möglichkeiten zur Verarbeitung deklarativ repräsentierter Instanzen sind vor allem auch notwendig, um Feststellungen bezüglich der deklarativen Ähnlichkeit zweier Aufgaben treffen zu können, die ihrerseits wiederum eine entscheidende Voraussetzung für analoge Problemlöse- und Transferprozesse bei voraussetzungsreichen Aufgaben bilden.

Im nächsten Abschnitt wird dargestellt, welche Vorstellungen bezüglich eines Wissenstransfers – als zweite wesentliche Komponente für die Entstehung von Sequenzeffekten – in ACT existieren. Dabei wird vor allem auf die bereits angedeuteten, unzureichenden Möglichkeiten der Architektur zur Beschreibung von Analogie als Lern-, Problemlöse- und Transfermechanismus eingegangen.

3.1.2 Transfer in Act

Im Rahmen der ACT-Architektur wurden verschiedene, unterschiedlich elaborierte Modelle zum Transfer entwickelt und teilweise wegen mangelnder Plausibilität wieder verworfen. Diese Modelle unterscheiden sich danach, für welche Wissensarten ein Transfer vorhergesagt wird: In Singley und Andersons (1989) Theorie zum Transfer kognitiver Fertigkeiten wird angenommen, dass in einer Ausgangssituation erworbenes prozedurales Wissen direkt in einer Zielsituation angewendet werden kann (*procedural-to-procedural transfer* nach Singley & Anderson, 1989). Darüber hinaus wurden verschiedene Versuche unternommen, Analogie auf der Basis deklarativer Repräsentationen in ACT zu implementieren (*declarative-to-procedural transfer*).

Das in PUPS (*PenUltimate Production System*, technische Implementierung der Theorieversion ACT*) bzw. in ACT-R 2.0 (Anderson, 1993) implementierte Analogiemodell (Anderson & Thompson, 1989) beruht auf der Vorstellung, dass deklarativ repräsentiertes Wissen über eine frühere Problemlöseepisode genutzt wird, um für die Bewältigung einer neuartigen Aufgabenstellung prozedurales Wissen zu generieren (*declarative-to-procedural transfer*). Dieses Analogiemodell stellt unter anderem die Grundlage des bereits beschriebenen Modells zum Erwerb kognitiver Fertigkeiten (Anderson et al., 1997) dar. Es wurde jedoch mit dem Aufkommen der neuen Theorieversion ACT-R 4.0 (Anderson & Lebiere, 1998) zu Gunsten zweier alternativer technischer Implementierungen von Salvucci und Anderson (1998) verworfen, deren theoretischer Stellenwert im Hinblick auf die Entwicklung eines Analogiemechanismus für

ACT jedoch unklar ist. Eine dieser Implementierungen beruht auf prozeduralem Transfer, während die andere Implementierung auf einem deklarativen Transfer aufbaut. Die verschiedenen Modelle werden im Folgenden kurz skizziert.

Prozeduraler Transfer (Singley & Anderson, 1989). Diese im Rahmen der Architekturversion ACT* (Anderson, 1983) formulierte Theorie zum Transfer kognitiver Fertigkeiten versteht sich im Wesentlichen als Umsetzung von Thorndikes Transfertheorie der identischen Elemente (Thorndike, 1906, 1914, 1924; Thorndike & Woodworth, 1901). Nach dieser behavioristischen Theorie ist eine Übertragung des Gelernten auf eine neue Situation nur dann zu erwarten, wenn die beiden Situationen identische Elemente im Sinne assoziativer Reiz-Reaktionsverbindungen enthalten: „One mental function or activity improves another insofar as and because they are in part identical with it, because it contains elements common to them“ (Thorndike, 1906, S. 243). Singley und Anderson (1989) gehen davon aus, dass prozedurales Wissen die präzisierte Entsprechung von Thorndikes identischen Elementen darstellt, die das Ausmaß des Transfers zwischen zwei Situationen bestimmen. „Our basic proposal is that productions, once learned, can serve as the identical elements of Thorndike’s theory“ (Singley & Anderson, 1989, S. 51).

Produktionen seien – so die Argumentation – auf Grund ihrer zweigeteilten Struktur geeignet, im Bedingungsteil Stimulusinformation zu spezifizieren, während der Aktionsteil die abzugebende Reaktion repräsentiert. Sie sind laut Singley und Anderson (1989) durch vier Merkmale gekennzeichnet, die sie als besonders geeignete Umsetzungen der Thorndikeschen Idee der identischen Elemente erscheinen lassen.

- Produktionen sind voneinander unabhängig und sind daher auch unabhängig voneinander auf neue Anwendungssituationen übertragbar.
- Produktionen sind das Resultat eines singulären Lernprozesses, bei dem deklaratives Wissen in prozedurales Wissen transformiert wird (*production compilation*). Dieses *single-trial learning* ermöglicht es, dass das Vorliegen oder Nicht-Vorliegen einzelner Produktionsregeln zu einem Zeitpunkt genau bestimmt werden kann.
- Einmal gebildete Produktionen unterscheiden sich in ACT* in ihrer Produktionsstärke, die davon abhängt, wie intensiv die durch sie repräsentierte Fertigkeit geübt wurde. In ACT* legt die Produktionsstärke die Verfügbarkeit einer

Produktion fest². Die Optimierung der Produktionsstärke durch fortlaufende Übung entspricht der kontinuierlichen Verstärkung von assoziativen Reiz-Reaktions-Verknüpfungen.

- Produktionen ermöglichen es laut Singley und Anderson einen Abstraktionsgrad herzustellen, der der assoziationstheoretischen Sichtweise Thorndikes nahe kommt. Insbesondere postulieren Singley und Anderson, dass der in Produktionen realisierte Abstraktionsgrad gewährleistet, dass das Ausmaß des Transfers unabhängig vom Problemkontext sei.

Vor allem dieses letzte Argument, welches nach Singley und Anderson (1989) für eine Entsprechung zwischen Produktionsregeln einerseits und identischen Elementen nach Thorndike andererseits spricht, wird allerdings z.B. durch Gray und Orasanu (1987) in Frage gestellt. Produktionsregeln sind auf Grund der in ihnen enthaltenen Möglichkeit zur Variabilisierung von Anwendungsbedingungen wesentlich abstrakter als Reiz-Reaktionsbedingungen. So konnte Thorndike nachweisen, dass bereits sehr geringfügige Änderungen der Anwendungs- gegenüber der Ausgangssituation Leistungseinbußen bei der Transferaufgabe bewirken können. Beispielsweise zeigte sich beim Bearbeiten einfacher algebraischer Gleichungen, dass Versuchspersonen, die das Auflösen solcher Gleichungen mit zwei Variablenbezeichnungen (z.B. x und y) gelernt hatten, Schwierigkeiten hatten, Aufgaben der gleichen Struktur zu lösen, die jedoch andere Variablenbezeichnungen (z.B. g und h) enthielten (Thorndike, 1924). Diese Transferschwierigkeiten wären nach Singley und Anderson (1989) nicht zu erwarten, da die Ausführung von entsprechenden Produktionsregeln unabhängig von den konkreten Variablenbezeichnungen sein sollte.

Die Theorie von Singley und Anderson (1989) und Thorndikes Transfertheorie weisen allerdings – unabhängig von diesem Punkt – insofern eine hohe Übereinstimmung auf, als dass sie beide auf den Erwerb und auf die Nutzung kognitiver Fertigkeiten (d.h. auf prozedurales Wissen) fokussieren. Die Bedeutung deklarativen Wissens wird in beiden Ansätzen vollständig vernachlässigt.

Um das Ausmaß eines Fertigkeitstransfers zwischen zwei Situationen vorherzusagen, wird in der Regel eine auf die symbolisch-prozedurale Repräsentationsebene

² In ACT-R determiniert die Produktionsstärke dagegen die Geschwindigkeit, mit der die Produktionsregel ausgeführt werden kann, während ihre Verfügbarkeit durch den *expected gain* festgelegt wird.

beschränkte, mehrstufige Aufgabenanalyse eingesetzt (Kieras & Bovair, 1986; Pirolli & Recker, 1994). Diese besteht in einer formalen Analyse der in der Ausgangssituation erwerbenden Produktionsregeln sowie der für die Bearbeitung der Kriteriumsaufgabe benötigten Fertigkeiten und darauf aufbauend in einer Bestimmung der strukturellen Ähnlichkeit zwischen beiden Situationen als Determinante des Transfers:

- *Analyse der in der Ausgangssituation erwerbenden Produktionsregeln:* In einem ersten Schritt wird die Ausgangssituation dahingehend analysiert, welche Produktionsregeln in ihr potenziell erworben werden können. Eine mögliche Ausgangssituation kann z.B. darin bestehen, dass Lerner mit Übungsaufgaben konfrontiert werden, deren Bearbeitung zunächst zu deklarativem Wissen führt, welches in der Ausgangssituation über den *production compilation*-Mechanismus in Produktionsregeln überführt wird bzw. werden kann (vgl. Abschnitt 3.1.1).
- *Analyse der für die Bearbeitung der Kriteriumsaufgabe benötigten Fertigkeiten:* Im zweiten Schritt wird durch die kognitive Modellierung einer erfolgreichen Aufgabenbearbeitung analysiert, welche Produktionen für die Bearbeitung der Transferaufgabe benötigt werden.
- *Bestimmung der strukturellen Ähnlichkeit zwischen Ausgangssituation und Anwendungssituation als Determinante des Transfers:* Die Vorhersage lautet, dass sich die Ausgangs- und die Anwendungssituation umso ähnlicher sind und der daher zu erwartende Transfer umso größer ist, je größer die Schnittmenge derjenigen Produktionsregeln, die in der Ausgangssituation generiert werden können, und derjenigen Produktionsregeln, die für die nachfolgende Aufgabenbearbeitung benötigt werden, ausfällt. „To the extent that the production sets overlap, transfer would be positive from one task to the other“ (Singley & Anderson, 1989, p. 31). Diese Annahme konnte in einer Reihe empirischer Untersuchungen, die mit entsprechenden Aufgabenanalysen verknüpft wurden, bestätigt werden (Kieras & Bovair, 1986; Pirolli & Anderson, 1985; Pirolli & Recker, 1994).

Diese Art der Aufgabenanalyse ermöglicht eine präzise Vorhersage bezüglich des Erwerbs und des Transfers von Fertigkeiten, beruht allerdings auf einer sehr einseitigen Definition struktureller Ähnlichkeit. In der auf ACT* beruhenden Produktionssystemanalyse wird strukturelle Ähnlichkeit ausschließlich auf der Basis benötigter atomarer Fertigkeiten definiert, d.h. als Überlappung von im prozeduralen Gedächtnis

repräsentierbaren Wissensbeständen (prozedurale Ähnlichkeit nach Chen, 2002). Weiterhin wird angenommen, dass diese Überlappung das Ausmaß des automatisch einsetzenden Transfers zwischen zwei Aufgaben bestimmt, indem einzelne Produktionsregeln unabhängig voneinander auf nachfolgende Aufgaben übertragen werden. Das Transfermodell von Singley und Anderson (1989) kann damit zwar genutzt werden, um Prozesse der Wissensübertragung bei Aufgaben zu beschreiben, für deren Bearbeitung die relevanten Produktionen bereits vorliegen oder generiert werden können. Es erweist sich so als geeignet, sowohl Transferprozesse für voraussetzungsarme Aufgaben als auch für voraussetzungsreiche Aufgaben zu beschreiben – vorausgesetzt, für letztere liegt bereits Vorwissen auf Expertenniveau in Form abstrakter Aufgabenschemata vor (vgl. Koedinger & Anderson, 1990 zur prozeduralen Implementierung von Aufgabenschemata). Das Transfermodell von Singley und Anderson ist aber ungeeignet, um Bearbeitungsprozesse bei voraussetzungsreichen Aufgaben zu spezifizieren, die auf der analogen Nutzung von Fallwissen beruhen und daher durch einen deliberativen Bezug auf deklarative Aufgabenrepräsentationen gekennzeichnet sind.

Zeitgleich zu Singley und Andersons (1989) Theorie zum Transfer kognitiver Fertigkeiten publizierten Anderson und Thompson (1989) einen Beitrag darüber, wie man sich einen solchen analogen Transfer auf der Basis der damaligen Theorieversion ACT* bzw. ihrer technischen Implementierung PUPS vorstellen könne. Diese Vorstellungen wurden für die Theorieversion ACT-R 2.0 (Anderson, 1993) aufrechterhalten.

Analogie in PUPS/ACT-R 2.0 (Anderson, 1993; Anderson & Thompson, 1989). Der im PUPS-System sowie in ACT-R 2.0 implementierte Analogiemechanismus basiert darauf, dass in einem ersten Schritt Wissen, welches aus der Bearbeitung einer Aufgabe oder aus der Verarbeitung eines ausgearbeiteten Beispiels resultiert, in Form schemaartiger deklarativer Strukturen (Sets von *chunks*) repräsentiert wird. Bei der Konfrontation mit einer neuen Aufgabe werden zwei Suchprozesse ausgeführt. Erstens wird unter den verschiedenen gespeicherten Problemlöseepisoden nach einem potenziellen Quellproblem gesucht. Wurde dies identifiziert, wird in einem zweiten Schritt versucht, zwischen der Repräsentation dieses Problems sowie der Repräsentation der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe Korrespondenzen herzustellen, um daraus eine neue Produktionsregel zu generieren. Die dabei resultierende Produktionsregel ist sehr komplex, da ihre Anwendung zur Lösung nachfolgender Aufgaben in

einem Schritt führt. „The analogized production rule typically solved large problems in a single step – the left-hand side matched a full description of the problem and the right-hand side created or modified all chunks needed for the response“ (Salvucci & Anderson, 1998, S. 343).

Der im PUPS-System sowie in ACT-R 2.0 implementierte Analogiemechanismus hat sich allerdings nicht durchsetzen können, da insbesondere die zu Grunde liegenden Annahmen zur Komplexität der resultierenden Produktionsregeln im Hinblick auf die beim Menschen gegebene Beschränktheit kognitiver Ressourcen als unplausibel gilt. Weitere von Anderson und Lebiere (1998) formulierte Kritiken an diesem Analogiemechanismus beziehen sich auf die Tatsache, dass aus seiner Anwendung häufig nicht alle zur Bearbeitung benötigten Produktionsregeln generiert werden und dass auch ungeeignete Quellprobleme ausgewählt werden, so dass falsche Produktionsregeln generiert werden: „Many times it had problems finding the right example“ (Anderson & Lebiere, 1998).

Alternative Vorstellungen zu diesem Analogiemechanismus wurden von Salvucci und Anderson (1998) auf der Basis von ACT-R 4.0 beschrieben. Die hier vertretene Auffassung ist in Einklang mit dem in dieser Architekturversion vertretenen Anspruch einer atomaren Wissensrepräsentation.

Analogie in ACT-R 4.0 (Salvucci & Anderson, 1998). Grundlegend für die von Salvucci und Anderson (1998) vertretene Position ist die Annahme, dass für die Erklärung analoger Problemlöseprozesse kein eigener Analogiemechanismus benötigt wird, sondern dass Analogie mit Hilfe der architekturinhärenten Mechanismen von ACT-R beschrieben werden kann. Die mit dem Analogiemechanismus auf der Basis des PUPS-Systems bzw. der ACT-Version 2.0 verbundenen Schwierigkeiten werden teilweise umgangen, indem vor allem der Prozess der Auswahl eines geeigneten Quellproblems nicht modelliert wird.

Salvucci und Anderson (1998) schlagen zwei alternative computationale Modelle vor, die beide eine Detailanalyse des *mapping*-Prozesses liefern sollen. Eines dieser Modelle operiert auf der Basis deklarativer Aufgabenrepräsentationen, während das zweite auf einer rein prozeduralen Ebene angesiedelt ist. Beide computational implementierten Modelle sind mit dem in ACT-R 4.0 vertretenen Anspruch einer atomaren Wissensrepräsentation vereinbar und zeigen eine hohe Übereinstimmung mit empirischen Daten (Salvucci & Anderson, 1998). Die Autoren merken an, dass daher

anhand dieser Kriterien keine Entscheidung darüber möglich sei, mit welchem der beiden Modelle eine bessere Verhaltensbeschreibung geliefert werden könne, sondern dass hierfür zusätzliche empirische Untersuchungen notwendig seien.

Es wird an dieser Stelle auf eine Darstellung der entweder deklarativ oder prozedural implementierten Modelle verzichtet, da angezweifelt wird, dass diese Modelle geeignet sind, analogen Transfer so zu beschreiben, wie er üblicherweise begriffen wird – nämlich als mehrstufiger, fehleranfälliger Prozess, der auf dem Erkennen relationaler Korrespondenzen zwischen den deklarativen Repräsentationen zweier Instanzen beruht (vgl. Abschnitt 2.2). Dieses Argument soll anhand einer Beschreibung des Problemlöseexperiments untermauert werden, dessen Daten von Salvucci und Anderson (1998) modelliert werden.

Bei diesem Experiment mussten die Versuchspersonen für insgesamt acht verschiedene Aufgabenkategorien aus der Physik die Lösung einer Beispielaufgabe auf jeweils fünf isomorphe Testaufgaben übertragen. Jede der Testaufgaben wurde mit dem dazugehörigen Beispiel zusammen dargeboten. Die Testaufgaben unterschieden sich von dem Beispiel nur dahingehend, dass in ihnen die Reihenfolge der lösungsrelevanten Informationen sowie die Bezeichnungen für einzelne Variablen variiert wurden. Die empirisch ermittelten Lösungsraten für diese Aufgaben lagen zwischen 90 und 100 Prozent. Diese experimentelle Referenzsituation ist im Vergleich zu anderen experimentellen Settings, in denen analoger Transfer untersucht wird, untypisch und artifiziell, da Versuchspersonen im Wesentlichen eine rein syntaktische Übertragung von vorgegebenen Lösungselementen leisten müssen. Für Versuchspersonen ist es nicht erforderlich, die Relationen zwischen einzelnen Lösungselementen zu verstehen oder strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Beispiel und Testaufgabe auf der Basis deliberativer Abstraktionsprozesse zu erkennen. Diese Künstlichkeit der Situation spiegelt sich auch in den für voraussetzungsreiche Aufgaben ungewöhnlich hohen Lösungsraten wider.

Fazit: Transfermechanismen in ACT und Sequenzeffekte

Die für die Entstehung von Sequenzeffekten relevanten Transferprozesse können mit Hilfe von ACT unterschiedlich gut beschrieben werden, je nachdem, ob angenommen wird, dass diese in einem Transfer bereits vorliegender Produktionsregeln bestehen

oder aber in einer Übertragung und Nutzung analoger deklarativer Aufgabenrepräsentationen.

Das Transfermodell von Singley und Anderson (1989) kann eingesetzt werden, um Prozesse der Wissensübertragung sowohl für voraussetzungsarme als auch teilweise für voraussetzungsreiche Aufgaben zu beschreiben. Für die Beschreibung von Transferprozessen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben mit Hilfe dieses prozeduralen Modells ist es aber notwendig anzunehmen, dass bereits hinreichend Vorwissen in Form abstrakter Aufgabenschemata vorliegt, die ihrerseits als Produktionen realisiert werden können (Koedinger & Anderson, 1990).

Um allerdings Transferprozesse bei voraussetzungsreichen Aufgaben zu spezifizieren, die auf der analogen Nutzung von Fallwissen beruhen und daher durch einen deliberativen Bezug auf deklarative Aufgabenrepräsentationen gekennzeichnet sind, erweist sich das Modell von Singley und Anderson (1989) als ungeeignet (vgl. Strube & Janetzko, 1990). Die für die Darstellung analoger Problemlöse- und Transferprozesse in ACT entwickelten alternativen Vorstellungen sind allerdings ebenfalls aus den verschiedensten Gründen problematisch. Der von Anderson und Thompson (1989) beschriebene Analogiemechanismus ist zwar relativ umfassend und berücksichtigt viele der für analogen Transfer als relevant angesehenen Eigenschaften (z.B. deklarative Repräsentation von Fallwissen und Zielproblemen, Suche nach geeigneten Quellproblemen), konnte aber technisch nie zufrieden stellend umgesetzt werden und basiert auf Annahmen, die für das ressourcenbegrenzte menschliche kognitive System unplausibel erscheinen.

Die beiden von Anderson und Salvucci (1998) für ACT-R 4.0 vorgeschlagenen Analogiemodelle sind im Wesentlichen technische Implementierungen, deren theoretische Reichweite aber begrenzt erscheint. Während in ACT davon ausgegangen wird, dass die Verfügbarkeit von Wissen (d.h. von erforderlichen Produktionsregeln oder auch von deklarativen Wissensstrukturen) hinreichend ist, um eine Lösung für eine neue Aufgabe zu erzeugen, ist nach Auffassung von Theorien zum analogen Transfer das grundsätzliche Vorhandensein von erforderlichen Wissensvoraussetzungen (wie z.B. von strukturell ähnlichen Quellproblemen) nur eine von vielen Determinanten, die bestimmen, ob es zu einem erfolgreichen Transfer kommt oder nicht. Der Erfolg analogen Problemlösens hängt nach diesen Theorien nämlich auch davon ab, wie gut jeder der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Teilprozesse bewältigt wurde, wobei vor allem verschiedene Arten von Ähnlichkeiten zwischen Quell- und Zielproblem

sowie deren Wahrnehmung durch den Problemlöser wichtige Determinanten zu sein scheinen. Gerade diese Teilprozesse werden jedoch bei der Modellierung analoger Problemlöseprozesse in ACT explizit unberücksichtigt gelassen – möglicherweise unter anderem auch, weil ihre technische Umsetzung sich schwierig gestaltet (vgl. die Auswahl von Quellproblemen in PUPS / ACT-R 2.0).

ACT erweist sich damit zum jetzigen Zeitpunkt als ungeeignet, um einen analogen Wissenstransfer für voraussetzungsreiche Aufgaben mit Hilfe architekturinhärenter Mechanismen darzustellen, bei dem die Wahrnehmung und Interpretation von Aufgabenmerkmalen gegenüber der objektiven Aufgabenstruktur an Bedeutung für das Ergebnis des Problemlöseprozesses gewinnt (Gick & Holyoak, 1987).

Um Vorhersagen über das Auftreten von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben treffen zu können, ist es notwendig, die Bedingungen zu kennen, unter denen es zu einem analogen Transfer – als eine wesentliche Komponente bei der Entstehung von Sequenzeffekten – kommt. Diese Bedingungen sind in der Analogieforschung auf der Basis der beiden vorherrschenden Theorien – der *Structure Mapping* Theorie und der *Multiconstraint* Theorie – intensiv erforscht worden, und es liegen verhältnismäßig viele Erkenntnisse zu diesem Thema vor. Die Analyse von Transferbedingungen ermöglicht es vor allem auch, der Tatsache Rechnung zu tragen, dass ein positiver Transfer trotz vorhandenen Wissens und hoher objektiv bestehender struktureller Ähnlichkeiten zwischen Ausgangs- und Anwendungssituation ausbleiben kann (*inert knowledge* nach Renkl, Mandl & Gruber, 1996).

Im folgenden Abschnitt werden für die verschiedenen Teilprozesse analogen Transfers die Voraussetzungen beschrieben, die sowohl für einen Transfer im Allgemeinen als aber auch für einen positiven, d.h. erfolgreichen Transfer im Besonderen gegeben sein müssen. Teilweise wird dabei auf einzelne Annahmen der beiden genannten Transfertheorien genauer eingegangen, um die Bedeutung der genannten Voraussetzungen aus der Perspektive der jeweiligen Theorie zu beleuchten. Aufbauend auf dieser Bedingungsanalyse werden Untersuchungsfragen für die eigene Untersuchung im Hinblick auf die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben formuliert.

3.2 Bedingungen für einen (erfolgreichen) analogen Transfer

Im Folgenden werden verschiedene Bedingungen für einen erfolgreichen analogen Transfer beschrieben (vgl. auch Novick, 1995), und es wird – soweit möglich – empirische Evidenz zum Nachweis der Bedeutsamkeit der identifizierten Bedingungen herangezogen (Tabelle 5). Zusätzlich werden moderierende Faktoren aufgeführt, die wesentlich für das Vorliegen günstiger Rahmenbedingungen verantwortlich sind. Während die Bedingungen jeweils spezifisch für einen bestimmten Teilprozess analogen Transfers formuliert sind, lassen sich mindestens drei moderierende Faktoren identifizieren, deren Einfluss sich mehr oder weniger durch den ganzen Problemlöseprozess zieht. Hierzu gehören (1) die Ausprägung und Wahrnehmung von Strukturmerkmalen bzw. strukturellen Ähnlichkeiten, (2) die Kombination von Strukturmerkmalen mit Oberflächenmerkmalen und (3) die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens.

Ein positiver analoger Transfer ist nach der vorgestellten Bedingungsanalyse nur dann zu erwarten,

- wenn dem Problemlöser eine möglichst vollständige, hinreichend abstrakte und auf lösungsrelevanten Merkmalen beruhende Repräsentation des Zielproblems gelingt,
- wenn er dann erkennt, dass ihm früher gemachte Problemlöseerfahrungen bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgabe nützlich sein können,
- wenn aus Sicht des Problemlösers diese Nutzbarmachung früherer Problemlöseerfahrungen mit geringeren Kosten verbunden ist als alternative Problemlösemethoden,
- wenn er ein geeignetes, d.h. strukturell ähnliches Quellproblem auswählt,
- wenn er im anschließenden *mapping* geeignete strukturelle Korrespondenzen identifiziert, gegebenenfalls fehlende Informationen erschließt und die erstellten Korrespondenzen nutzt, um einen Lösungsweg für das Zielproblem zu inferieren und
- wenn er über Wissen bezüglich der Anwendungsbedingungen und Funktionen einzelner Lösungsschritte verfügt, das ihm gegebenenfalls eine Adaption des bekannten Lösungswegs erlaubt.

Tabelle 5: Bedingungen für einen erfolgreichen analogen Transfer

Teilprozess	Bedingung	Moderierende Faktoren	Evidenz
SUCHPHASE			
Repräsentation des Zielproblems	Vollständige, korrekte und hinreichend abstrakte Repräsentationen des Zielproblems	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretation des Zielproblems auf der Basis von Eigenschaften bereits bekannter Aufgaben 	Blanchette und Dunbar (2002) Ross und Bradshaw (1994)
		<ul style="list-style-type: none"> • Orientierung an Oberflächenmerkmalen des Zielproblems • Schwierigkeiten beim Erkennen von Strukturmerkmalen • Domänenspezifisches Vorwissen 	Chi, Feltovich und Glaser (1981) Chi, Glaser und Rees (1982) Hardiman, Dufresne und Mestre (1989) Kintsch (1998) Nathan, Kintsch und Young (1992) Quilici und Mayer (1996) Reed (1987) Reusser (1994) Schoenfeld und Herrmann (1982) Silver (1981)
Aktivierung von Quellproblemen	Initiierung des analogen Problemlöseprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • Einschätzung der Nützlichkeit früherer Problemlöseepisoden 	Gick und Holyoak (1980, 1983) Hayes und Simon (1977) Perfetto, Bransford und Franks (1983) Reed, Ernst und Banerji (1974) Weisberg, DiCamillo und Phillips (1978)
		<ul style="list-style-type: none"> • Domänenspezifisches Vorwissen 	Novick (1988)
		<ul style="list-style-type: none"> • Kosten-Nutzen-Analyse für analoges Problemlösen 	[Novick (1988)] [Reed, Ernst und Banerji (1974)] [Holyoak (1985)]

Tabelle 5: Bedingungen für einen erfolgreichen analogen Transfer (Fortsetzung)

Teilprozess	Bedingung	Moderierende Faktoren	Evidenz
Auswahl eines Quellproblems	Auswahl eines strukturell ähnlichen Quellproblems	<ul style="list-style-type: none"> • Orientierung an Oberflächenmerkmalen 	Catrambone und Holyoak (1989) Hesse (1991a, b) Hesse und Klecha (1990) Holyoak und Koh (1987) Keane (1987) Reed, Ackinclose und Voss (1990) Ross (1985, 1987, 1989a, b) Ross und Kennedy (1990)
		<ul style="list-style-type: none"> • Domänenspezifisches Vorwissen 	Novick (1988) Reed, Ackinclose und Voss (1990)
NUTZUNGSPHASE			
Mapping und Inferenz	Konstruktion vollständiger und geeigneter Entsprechungen	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennen struktureller Korrespondenzen • Orientierung an Oberflächenmerkmalen • Domänenspezifisches Vorwissen 	Hesse und Hahn (1994) Heydenbluth & Hesse (1996) Novick (1988) Novick und Holyoak (1991) Ross (1987, 1989; Ross & Kilbane, 1997)
Musterergänzung und Adaption	Gelingen von Musterergänzungs- und Adaptionprozessen	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboration der Relationen innerhalb von Aufgabenlösungen • Wissen über Anwendungsbedingungen und Funktionen einzelner Lösungsschritte 	Catrambone (1994, 1995, 1996, 1998) Cooper und Sweller (1987) Novick (1995) Novick und Holyoak (1991) Reed, Ackinclose und Voss (1990) Reed und Bolstad (1991) Reed, Dempster und Ettinger (1985) Renkl (1997) Sweller und Cooper (1985)

Anmerkung: Literaturangaben in eckigen Klammern bedeuten, dass die entsprechenden Angaben zu moderierenden Faktoren in Spalte 3 auf theoretischen Überlegungen der jeweiligen Autoren beruhen und nicht auf empirischer Evidenz.

Diese Bedingungen werden im Folgenden auf der Basis empirischer Evidenz und aus der Perspektive der beiden zentralen Theorien zum analogen Transfer diskutiert.

Repräsentation des Zielproblems. Die mentale Repräsentation einer zu lösenden Aufgabe im Sinne des Anfertigen eines Situationsmodells (Cummins et al., 1988; Kintsch, 1998; Kintsch & Greeno, 1985; Nathan et al., 1992; Reusser, 1994; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992) wird durch mindestens vier Faktoren beeinflusst. Erstens können *Eigenschaften bereits bekannter Aufgaben* die Enkodierung von Zielproblemen moderieren, indem sie insbesondere im Fall uneindeutiger bzw. schwer zu verstehender Zielprobleme als Interpretationshilfen genutzt werden (Blanchette & Dunbar, 2002; Ross & Bradshaw, 1994). Dies kann sich so lange als hilfreich erweisen und zu einer korrekten Repräsentation des Zielproblems führen, wie diese zur Interpretation herangezogenen Aufgaben ähnliche Strukturmerkmale wie die zu lösende Aufgabe aufweisen bzw. Unterschiede hinsichtlich der Strukturmerkmale durch einen Problemlöser erkannt werden.

Im Hinblick auf die Identifikation struktureller Unterschiede zwischen potenziellen Quellproblemen und zu repräsentierenden Zielproblemen nehmen *Oberflächenmerkmale* als zweiter moderierender Faktor eine uneindeutige Rolle ein, die auch Gegenstand der eigenen Untersuchungen ist: Einerseits gibt es zahlreiche Evidenz, dass oberflächliche Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien dazu führen können, dass Lösungswege zwischen diesen Aufgaben fälschlicherweise übertragen werden. Ein solcher negativer Transfer kann unter anderem dadurch verursacht sein, dass oberflächlich ähnliche potenzielle Quellprobleme die Repräsentation des Zielproblems ungünstig beeinflussen. Für eine übermäßige Ausrichtung an Oberflächenmerkmalen von Aufgaben sowie für *Schwierigkeiten beim Erkennen der Strukturmerkmale* findet sich in einer Reihe von Experimenten Evidenz, in denen Versuchspersonen Aufgaben aus komplexen Domänen wie Mathematik oder Physik nach lösungsrelevanten Eigenschaften klassifizieren sollten (Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Chi, Glaser & Rees, 1982; Hardiman, Dufresne & Mestre, 1989; Quilici & Mayer, 1996; Reed, 1987; Schoenfeld & Herrmann, 1982; Silver, 1981). Die Ergebnisse dieser Studien fallen konsistent aus, indem sie immer wieder die Tendenz der Versuchspersonen, die vorgegebenen Aufgaben anhand ihrer Oberflächenmerkmale zu kategorisieren, belegen. Dieses Phänomen wird durch das *Vorhandensein domänenspezifischen Vorwissens* als viertem Faktor moderiert, indem

es insbesondere für Versuchspersonen mit geringem domänenspezifischem Vorwissen stark ausgeprägt ist und sich mit zunehmender Expertise verringert. Während in dieser Sichtweise die möglichen negativen Einflüsse von Oberflächenähnlichkeiten zwischen Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien betont werden, gibt es aber auch Argumente, die für eine positive Wirkung von Oberflächenähnlichkeiten sprechen.

Unterschiede hinsichtlich struktureller Eigenschaften von Aufgaben können nach dieser alternativen Sichtweise möglicherweise gerade dann besonders gut erkannt werden, wenn diese Aufgaben sich hinsichtlich aller anderen Merkmale besonders ähnlich sind. Durch eine hohe Übereinstimmung der Oberflächenmerkmale werden bestehende strukturelle Abweichungen so salient gemacht, dass sie vom Problemlöser leichter identifiziert werden können. Dieses Phänomen ist unter dem Begriff ‚*near miss*‘ in die Literatur zum analogen Problemlösen und zum Lernen aus Beispielen eingegangen, da die betrachteten Aufgaben nur in wenigen, aber relevanten Aufgabenmerkmalen voneinander abweichen und somit *fast* identisch sind (Gick & Paterson, 1992; Ross & Kilbane, 1997; Winston, 1975, 1980). In den eigenen Untersuchungen wird unter anderem untersucht, inwieweit Aufgabensequenzen, in denen oberflächlich ähnliche Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien aufeinander folgen und so die eben beschriebenen Kontrasteffekte ermöglichen, zu besseren Leistungen führen als Sequenzen, in denen die gleichen Aufgaben nach ihrer Zugehörigkeit zu einer bestimmten Aufgabenkategorie geblockt dargeboten werden (vgl. Experimente 1 bis 3 in Kapitel 6).

Während Oberflächenmerkmale vor allem die Korrektheit der Repräsentation des Zielproblems moderieren, besteht eine weitere Bedingung für einen erfolgreichen Transfer darin, dass die Zielproblemrepräsentation einen bestimmten Abstraktionsgrad aufweist. Dieser ist nach Gick und Holyoak (1980) mit Bezug auf analogen Transfer dann optimal, wenn mit ihm der Grad der Übereinstimmung zwischen der Repräsentation des Zielproblems und den Repräsentationen potenziell hilfreicher Quellprobleme maximiert wird, so dass strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den Repräsentationen besonders gut identifiziert werden können:

For use in solving a problem the optimal level of abstraction for representing an analogy may be that which maximizes the degree of correspondence between the two relational systems. In many cases a very detailed representation will include disanalogous relations,

while a very abstract representation will omit information about important correspondences.

(Gick & Holyoak, 1980, S. 314)

Dies bedeutet einerseits, von den Oberflächenmerkmalen der Aufgaben zu abstrahieren, da deren Ausprägungen für die Bestimmung struktureller Ähnlichkeit irrelevant sind. Andererseits sollten die Repräsentationen so detailliert sein, dass einzelne strukturelle Ähnlichkeiten so genau wie möglich beschrieben werden können. Übermäßig abstrakte Aufgabenrepräsentationen können dazu führen, dass die Zugänglichkeit und Anwendbarkeit der repräsentierten Problemlöseerfahrungen für spätere Problemlöseanforderungen erschwert wird (Ross & Kennedy, 1990; Shavlik et al., 1987). Die bereits vorgestellten Modelle zum Verstehen von Textaufgaben nehmen an, dass die Verfügbarkeit abstrakter Aufgabenrepräsentationen durch das vorhandene Vorwissen bestimmt wird, indem dieses die Transformation eines konkreten Situationsmodells einer Aufgabe in ein abstrakteres Problemmodell ermöglicht (Cummins et al., 1988; Kintsch, 1998; Kintsch & Greeno, 1985; Nathan et al., 1992; Reusser, 1994; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992).

Im Hinblick auf die Repräsentation eines Zielproblems ist es zusammenfassend für einen erfolgreichen Transfer notwendig, dass diese Repräsentation vollständig, korrekt und hinreichend abstrakt ist.

Aktivierung von Quellproblemen. Wurde das Zielproblem repräsentiert, so besteht der nächste Teilprozess in der Frage, welche Problemlösemethode zu seiner Lösung eingesetzt werden soll. Vielfach lässt sich hier beobachten, dass Problemlöser ein analoges Vorgehen als Problemlösemethode gar nicht erst in Betracht ziehen und dementsprechend keinen analogen Problemlöseprozess initiieren. Damit es zu einem analogen Transfer kommt, muss einerseits eine positive Einschätzung der Nützlichkeit früherer Problemlöseepisoden und andererseits eine zu Gunsten der analogen Problemlösemethode ausfallende Abwägung des Kosten-Nutzen Verhältnisses vorliegen.

Positive Einschätzung der Nützlichkeit früherer Problemlöseepisoden. Vielfach scheitern Problemlöser bereits daran, überhaupt selbständig zu erkennen, dass ihnen bekannte Problemlösungen auch für die Bearbeitung einer aktuellen Aufgabe nützlich sein können (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Hayes & Simon, 1977; Novick, 1988; Perfetto, Bransford & Franks, 1983; Reed et al., 1974; Schoenfeld, 1985; Weisberg, Di-

Camillo & Phillips, 1978). Die Wahrscheinlichkeit eines spontanen Rückgriffs auf frühere Problemlöseepisoden hängt vor allem davon ab, ob saliente Übereinstimmungen zwischen der aktuellen Aufgabe und früheren Erfahrungen verfügbar sind und erkannt werden: „Salient common components of either a surface or a structural nature will increase the likelihood that a problem solver will relate the two situations to each other“ (Gick & Holyoak, 1987, S. 16).

Je geringer die Salienz der Merkmalsübereinstimmungen ist, desto eher bedarf es gezielter Hinweise, in denen Problemlöser darüber informiert werden, dass sie bereits mit nützlicher Information konfrontiert waren, um einen deliberativen Abrufs- und Vergleichsprozess anzustoßen (VanLehn, 1996). Die Ergebnisse Novicks (1988) zeigen zusätzlich, dass Experten im Vergleich zu Novizen eher auf frühere Problemlöseepisoden zurückgreifen und diese als Quellprobleme nutzen. Die mangelnde spontane Nutzung bereits bekannter Problemlöseepisoden kann dahingehend interpretiert werden, dass die Initiierung des Transferprozesses eine nicht-automatische Komponente analogen Problemlösens darstellt (Weisberg et al., 1978).

In Einklang mit dieser Interpretation zeigten Gick und Holyoak (1980), dass lediglich 30% ihrer Versuchspersonen ein zuvor präsentiertes analoges Quellproblem spontan heranzogen, um ein Zielproblem zu lösen. Dagegen produzierten 75% der Versuchspersonen eine analoge Lösung, nachdem sie einen Hinweis erhalten hatten, dass das zuvor präsentierte Problem möglicherweise hilfreich für die Bearbeitung des Zielproblems sein könnte. Berücksichtigt man zusätzlich, dass 10% der Versuchspersonen auch dann eine Lösung generierten, wenn sie kein analoges Problem gesehen hatten, können diese Befunde dahingehend interpretiert werden, dass lediglich 20% der Probanden spontanen Transfer zeigten – nämlich die 30%, die ohne Hinweis auf ein Quellproblem das Zielproblem lösten, minus die 10%, die auch ohne Quellproblem eine Lösung generierten.

In den Experimenten von Reed et al. (1974) mussten die Versuchspersonen zwei isomorphe Aufgaben (Missionare-Kannibalen Problem und das Problem der eifersüchtigen Ehemänner, vgl. Abschnitt 1.3) nacheinander bearbeiten. Eine Befragung der Versuchspersonen bezüglich der von ihnen zur Lösung der zweiten Aufgabe eingesetzten Strategien ergab, dass keine der Versuchspersonen die vollständige Sequenz der bei der ersten Aufgabe verwendeten Lösungsschritte erinnerte und auf die nachfolgende Aufgabe übertrug. Nur 12,5% der Versuchspersonen (n = 7) gaben an, einen Großteil bereits bekannter Lösungsschritte von der ersten auf die zweite Auf-

gabe angewendet zu haben, während über die Hälfte (57,71%; n = 32) zu erkennen gab, dass sie nur gelegentlich bei ihren Lösungsversuchen für die zweite Aufgabe auf die erste Aufgabe zurückgegriffen hatten. Stattdessen hatten sie überwiegend versucht, die zweite Aufgabe unabhängig von der ersten Aufgabe zu lösen. Die übrigen 30,36% (n = 17) gaben an, bei der Lösung der zweiten Aufgabe überhaupt nicht auf die zuerst bearbeitete Aufgabe referiert zu haben. Die Studien von Gick und Holyoak (1980), Weisberg et al. (1978), Perfetto et al. (1983) sowie Reed et al. (1974) liefern Hinweise darauf, dass wesentliche Voraussetzungen für analoge Problemlöseversuche in einer korrekten Nützlichkeits einschätzung bekannter Problemlöseepisoden sowie in der Berücksichtigung nützlicher Informationen bestehen. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass Problemlöser eine Kosten-Nutzen-Abwägung zu Gunsten analogen Problemlösens vornehmen.

Zu Gunsten der analogen Problemlösemethode ausfallende Abwägung des Kosten-Nutzen Verhältnisses. Eine mögliche Ursache für einen Verzicht auf ein analoges Vorgehen beim Problemlösen liegt darin, dass Problemlöser die hohe kognitive Beanspruchung scheuen, die mit dieser Vorgehensweise verbunden ist und stattdessen weniger aufwändige, aber auch weniger Erfolg versprechende Methoden wie z.B. suchbasierte Problemlösemethoden bevorzugen (vgl. *satisficing* nach Simon, 1980). Je höher die mit analogem Problemlösen verbundenen kognitiven Kosten relativ zu dem zu erwartenden Nutzen sind, desto unwahrscheinlicher könnte die Initiierung eines analogen Vorgehens werden. Derartige Überlegungen zum Einfluss antizipierter Kosten-Nutzen Kalkulationen bei der Strategiewahl sind in der kognitiven Psychologie allgemein prominent (Anderson & Lebiere, 1998; Beach & Mitchell, 1978; Christensen-Szalanski, 1980, 1998; Lovett & Anderson, 1996; Payne, Bettman & Johnson, 1988, 1993; Schunn, Lovett & Reder, 2001; Schunn & Reder, 2001; Siegler & Shipley, 1995) und lassen sich auch heranziehen, um die Wahrscheinlichkeit eines analogen Transfers vorherzusagen. Beispielsweise haben Beach und Mitchell (1978) für den Bereich der Entscheidungsfindung ein Modell vorgeschlagen, welches erklären soll, warum bei Entscheidungsproblemen häufig nicht die normativ optimale Entscheidungsfindungsstrategie gewählt, sondern stattdessen auf weniger Erfolg versprechende Heuristiken zurückgegriffen wird (vgl. Payne et al., 1988, 1993). Nach diesem Modell hängt die Auswahl einer Strategie nicht nur von Merkmalen der Aufgabe und Merkmalen des Entscheidungssuchenden ab, sondern zusätzlich vom zu erwartenden Nettogewinn, der sich durch den Einsatz einer bestimmten Strategie

ergibt. Ausgewählt wird demnach die Strategie, die unter einer gegebenen Aufgaben-Personen-Konfiguration den höchsten Nettogewinn zu liefern verspricht. Eine Formalisierung und empirische Überprüfung dieses Modells wurde von Christensen-Szalanski (1980, 1998) vorgenommen.

Novick (1988) versucht mit entsprechenden Überlegungen die Ergebnisse von Weisberg et al. (1978) sowie von Perfetto et al. (1983) zu erklären, die in ihren Studien keinen spontanen Transfer fanden. Sie geht davon aus, dass Problemlöser auf ein Absuchen sämtlicher Gedächtnisinhalte verzichteten, um mögliche Kosten im Problemlöseprozess gering zu halten. „The time and the effort required to search one’s entire knowledge base for potentially relevant information is unlikely to be worth the effort“ (Novick, 1988, S. 511).

Auch Reed und Mitarbeiter (1974) gehen davon aus, dass die durch die Suche nach einer analogen Aufgabe entstehenden Kosten determinieren, ob eine Aufgabe analog zu einer früheren Problemlöseepisode gelöst wird. Insbesondere postulieren die Autoren, dass die Kosten für die Gedächtnissuche nach einem Quellproblem geringer ausfallen müssen als die Kosten, die durch die Suche nach einer Lösung für die aktuelle Aufgabe resultieren, *ohne* dass auf vorangegangene Problemlöseerfahrungen referenziert wird: „The total time to retrieve, translate, and use analogous information to find an operator should be less than the total time to find the same operator without using information from the previous problem“ (Reed et al., 1974, S. 448).

Diese Befunde und Überlegungen zeigen deutlich, dass analoges Problemlösen nicht nur ein Prozess ist, der auf jeder der beschriebenen Stufen relativ fehleranfällig ist. Darüber hinaus weisen sie darauf hin, dass diese Problemlösemethode auch mit hohen kognitiven Kosten verbunden und damit nicht Folge eines automatischen Übertragungsprozesses ist (vgl. auch die Unterscheidung zwischen *low road* und *high road* Transfer nach Salomon & Perkins, 1989). Diese hohen Kosten bewirken, dass analoge Problemlöseprozesse nur dann deliberativ eingesetzt werden, wenn andere Methoden nicht zur Verfügung stehen oder fehlgeschlagen sind (Holyoak, 1985), weil entsprechendes Wissen fehlt. Welche Problemlösemethode auf Grund ihres günstigeren Kosten-Nutzen Verhältnisses geeigneter ist, hängt zusätzlich von der Art der zu bearbeitenden Aufgabe ab. "It will be difficult to demonstrate transfer between instances of a category of problems defined by a complex rule if the problems can be

solved more easily by trial and error than by learning the rule" (Gick & Holyoak, 1987, S. 21).

Die erfolgreiche Initiierung analogen Transfers setzt zusammenfassend erstens voraus, dass ein Problemlöser erkennt, dass auf einem geeigneten Abstraktionsniveau repräsentierte Quellprobleme bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgabe nützlich sein können – entweder weil er über hinreichendes Vorwissen verfügt oder weil er entsprechende Hinweise erhält. Zweitens muss diese Nutzbarmachung früherer Problemlöseerfahrungen aus der Sicht des Problemlösers mit geringeren Kosten verbunden sein als alternative Problemlösemethoden.

Auswahl eines Quellproblems. Wurde ein analoger Problemlöseprozess durch Aktivierung potenzieller Quellprobleme im Gedächtnis initiiert, besteht die nächste Schwierigkeit darin, unter diesen Quellproblemen zwischen geeigneten und ungeeigneten Problemen zu unterscheiden. Gentner (Gentner et al., 1993) postuliert in diesem Zusammenhang, dass vor allem strukturelle Ähnlichkeiten (*soundness*) bestimmen, welches Quellproblem für den nachfolgenden *mapping*-Prozess ausgewählt wird. Die Auswahl eines geeigneten, d.h. strukturell ähnlichen, Quellproblems stellt eine entscheidende Bedingung für einen erfolgreichen Transfer dar.

Demgegenüber stehen allerdings eine Vielzahl empirischer Befunde, die zeigen, dass sich Problemlöser nicht nur bei der Zielproblemrepräsentation, sondern auch im Auswahlprozess zu sehr an Ähnlichkeiten hinsichtlich der Oberflächenmerkmale der Aufgaben orientieren und zu wenig auf Übereinstimmungen hinsichtlich lösungsrelevanter Strukturmerkmale fokussieren (Hesse, 1991a, b; Hesse & Klecha, 1990; Holyoak & Koh, 1987; Keane, 1987; Reed et al., 1990; Ross, 1984, 1987, 1989). Novick (1988) konnte zeigen, dass diese übermäßige Ausrichtung an Oberflächenmerkmalen bei der Auswahl eines Quellproblems vor allem für Versuchspersonen mit geringem domänenspezifischem Vorwissen auftritt.

Verschiedene Autoren verweisen allerdings auch darauf, dass die Nutzung von Oberflächenmerkmalen beim Problemlösen oftmals eine relativ erfolgreiche Strategie darstellt, da in der Realität die Oberflächenmerkmale einer Aufgabe häufig mit dessen Strukturmerkmalen korreliert sind und diese daher auch häufig in entsprechenden Aufgabenschemata mit repräsentiert sind (vgl. Abschnitt 2.2; Blessing & Ross, 1996; Faries & Reiser, 1988; Hesse & Hahn, 1994; Hinsley et al., 1977; Mayer, 1981; Medin & Ross, 1989; Ross & Bradshaw, 1994). „If irrelevant aspects are often used

in a similar way for a particular problem type, a problem schema will be constructed that takes advantage of these correlations for identification and solution“ (Medin & Ross, 1989, S. 211). Wenn Übereinstimmungen zwischen den Oberflächenmerkmalen des Zielproblems und denen eines Quellproblems nur für solche Aufgaben auftreten, für die auch strukturelle Ähnlichkeiten bestehen, kann es zu Leistungsverbesserungen kommen, da in diesem Fall Oberflächenähnlichkeiten das Auffinden eines geeigneten Quellproblems oder Aufgabenschemas unterstützen (Keane, 1987). Problematisch ist demnach die Nutzung von Oberflächenmerkmalen als Auswahlkriterium nur dann, wenn dabei Strukturmerkmale so vernachlässigt werden, dass mögliche Dissoziationen zwischen Oberflächenmerkmalen und Strukturmerkmalen von Aufgaben nicht mehr erkannt werden. Im weiteren Verlauf werden dann solche Aufgaben als analoge Quellprobleme herangezogen, die lediglich in Oberflächenmerkmalen mit dem aktuellen Zielproblem übereinstimmen, aber keinerlei Gemeinsamkeiten in den lösungsrelevanten Strukturmerkmalen aufweisen (Bassok & Holyoak, 1989). Somit nehmen Oberflächenmerkmale nicht nur bei der Repräsentation von Zielproblemen, sondern auch bei der Auswahl von Quellproblemen eine bedeutsame, aber uneindeutige Rolle ein, indem sie entweder einen positiven Transfer fördern oder aber einen negativen Transfer bedingen können.

Reed und Mitarbeiter (1990) konnten zeigen, dass Oberflächenähnlichkeit als Selektionsmerkmal einen so starken Einfluss hat, dass für den Problemlöseerfolg wichtigere Eigenschaften keine Berücksichtigung mehr finden. In diesen Experimenten wurde bei der Auswahl eines Quellproblems weder die Komplexität eines potenziellen Quellproblems noch die Frage, inwieweit das Quellproblem entweder mehr oder aber weniger lösungsrelevante Information enthielt als für die Lösung des Zielproblems benötigt wurde (*inclusiveness*), in Betracht gezogen. Stattdessen wählten Versuchspersonen vor allem oberflächlich ähnliche Quellprobleme aus. Zusätzliche Performanzanalysen zeigten jedoch, dass sowohl die Komplexität des Quellproblems als auch dessen *inclusiveness* die Problemlöseleistung beeinflusste, während Oberflächenähnlichkeit keinen Leistungseinfluss hatte. Nach Reed et al. (1990, S. 89) zeigen die Ergebnisse „an evident lack of correspondence between perceived and actual usefulness of solutions“. Auch ein Fragebogen, bei dem die Versuchspersonen aus sechs möglichen Alternativen, diejenige Strategie angeben sollten, die sie zur Auswahl eines Quellproblems eingesetzt hatten, weist auf eine im Wesentlichen an Oberflächenähnlichkeiten orientierte Selektion hin (Tabelle 6).

Tabelle 6: Nennungshäufigkeiten in Prozent (absolute Häufigkeiten in Klammern) für Strategien zur Selektion eines Quellproblems (Reed et al., 1990)

Auswahlstrategie	Experiment 1 (N = 64)	Experiment 2 (N = 52)
Auswahl des oberflächlich ähnlicheren Problems unabhängig von dessen Komplexität	39,07%	44,23%
Auswahl des einfacheren Problems auf Grund seiner leichteren Verständlichkeit	28,13%	23,08%
Auswahl des einfacheren Problems, da üblicherweise leichtere Lösungswege vor komplexeren Lösungswegen unterrichtet werden	9,38%	9,62%
Auswahl des komplexeren Problems, da es mit größerer Wahrscheinlichkeit Informationen zur Lösung des aktuellen Problems beinhaltet	21,88%	17,31%
Auswahl des komplexeren Problems, da es herausfordernder ist	0%	1,92%
Alternative Strategie	0%	1,92%

Die in Tabelle 6 angegebenen Häufigkeiten beruhen auf Angaben, die die Versuchspersonen vor der Bearbeitung des Zielproblems gemacht hatten. Eine erneute Befragung nach der Bearbeitung des Zielproblems ergab interessanterweise keine Änderung bezüglich der angegebenen Selektionskriterien. Mit anderen Worten, Versuchspersonen revidierten ihre teilweise ungünstigen, da ausschließlich an Oberflächenähnlichkeiten orientierten Selektionsstrategien auch dann nicht, wenn diese mit einem Misserfolg bei der Problembearbeitung einhergegangen waren.

Zusammenfassend zeigt sich beim Abruf von Quellproblemen, dass in vielen Fällen Oberflächenmerkmale den Retrievalprozess gegenüber Strukturmerkmalen dominieren, so dass ungeeignete Quellprobleme abgerufen werden. Gick und Holyoak (1987) charakterisieren die Rolle von Oberflächen- und Strukturmerkmalen sowie von domänenspezifischem Vorwissen wie folgt:

In summary, perceived similarity, which is influenced by context, will determine whether transfer between two situations is attempted. Any salient shared component, whether surface or structural, will increase the probability that two situations will be viewed as similar by the learner. Whether the salient similarities that are noticed are in fact surface or structural will depend on factors such as the learner's expertise in the area. If transfer is attempted, objective structural similarity will determine whether transfer is positive or negative.

(Gick & Holyoak, 1987, S. 18)

Mapping und Inferenz. Eine Voraussetzung für ein erfolgreiches *mapping* von Quell- und Zielproblem besteht darin, dass existierende strukturelle Korrespondenzen zwischen diesen auch erkannt werden. Dabei scheinen verschiedene Arten von Korrespondenzen (z.B. konzeptuelle oder numerische Entsprechungen) unterschiedlich gut identifizierbar zu sein. Novick und Holyoak (1991) führten eine Reihe von Experimenten durch, in denen sie sowohl versuchten, den relativen Beitrag einzelner Schritte (*retrieval*, *mapping* und *adaptation*) für den Problemlöseerfolg zu analysieren als auch einzelne dieser Schritte detaillierter zu betrachten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass strukturelle Korrespondenzen relativ einfach entdeckt wurden, wohingegen die Entdeckung numerischer Entsprechungen ein größeres Hindernis für Versuchspersonen darstellte, so dass sie von entsprechenden Hinweisen profitierten.

Darüber hinaus wird diskutiert, inwieweit Übereinstimmungen hinsichtlich der Oberflächenmerkmale zwischen Quell- und Zielproblem das *mapping* sowie Inferenzprozesse ungünstig beeinflussen können. Verschiedene Autoren gehen davon aus, dass Oberflächenmerkmale vor allem die Aktivierung von Quellproblemen beeinflussen und weniger das *mapping* von Quell- und Zielproblem (Anderson & Thompson, 1989; Gentner, 1983; Gentner & Landers, 1985; Holyoak, 1985; Holyoak & Koh, 1987). So ist eine wesentliche Annahme der *Structure Mapping* Theorie (Gentner, 1983, 1989; Gentner & Markman, 1997), dass der *mapping*-Prozess ausschließlich durch strukturelle Merkmale der Aufgaben gesteuert wird (*soundness*; vgl. Abschnitt 2.2.1). Auch Holyoak, der diese Annahme einer rein syntaktischen Vorgehensweise zwar kritisiert und selbst davon ausgeht, dass zusätzlich semantische Ähnlichkeiten und pragmatische Ziele sich auf die Feststellung von Korrespondenzen auswirken (Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1997), nimmt an, dass der relative Einfluss von Ober-

flächenmerkmalen beim *mapping* eher gering ist. "Surface properties will tend to have a relatively greater impact on selection of a source analog than on the subsequent mapping process" (Holyoak, 1985, S. 82). Für diese Annahme findet sich auch eine Bestätigung in den Untersuchungen von Holyoak und Koh (1987). Diese konnten zeigen, dass der Einfluss von Oberflächen- und Strukturmerkmalvariationen identisch war, bevor Versuchspersonen einen Hinweis auf die Nützlichkeit der Quellprobleme erhalten hatten (also beim spontanen Abruf von Quellproblemen), während nach Erhalt des Hinweises (also beim *mapping*) nur noch Strukturmerkmalvariationen einen Einfluss auf die Problemlöseleistung hatten. Nach Holyoak und Thagard (1989a, b) beeinflussen Oberflächenähnlichkeiten wenn überhaupt das anfängliche *mapping*, bevor relevantere Merkmale wie strukturelle Ähnlichkeit oder die pragmatische Bedeutung die Suche nach Übereinstimmungen in den relationalen Systemen des Quell- und des Zielproblems steuern.

Holyoak (1985) aber auch Gentner (Gentner et al., 1993; Gentner & Toupin, 1986) räumen allerdings ein, dass Novizen auf Grund ihrer Schwierigkeiten, Oberflächenähnlichkeiten von Übereinstimmungen hinsichtlich der Struktur von Problemen zu unterscheiden, möglicherweise auch beim *mapping* auf semantische Ähnlichkeiten zwischen Quell- und Zielproblem Bezug nehmen.

Vertreter der so genannten *exemplar-based theories* gehen von der weiter gehenden Auffassung aus, dass Oberflächenmerkmale in allen Phasen analogen Problemlösens eine bedeutsame Rolle einnehmen können (Medin & Ross, 1989; Reeves & Weisberg, 1994; Ross, 1987, 1989a, b). In mehreren Studien konnte der dementsprechende Nachweis erbracht werden, dass Oberflächenmerkmale auch die Nutzung von Quellproblemen bei der Lösung des Zielproblems beeinflussen (Hesse & Hahn, 1994; Heydenbluth & Hesse, 1996; Novick, 1988; Ross, 1987, 1989a, b).

Hesse und Hahn (1994; Heydenbluth & Hesse, 1996) untersuchten die Fähigkeit von Versuchspersonen zur Ausarbeitung eines vorgegebenen Lösungsansatzes für ein Zielproblem in Abhängigkeit von der semantischen Einbettung der strukturell identischen Quellprobleme. Die Autoren konnten zeigen, dass Kontextähnlichkeit zwischen Quell- und Zielproblem die weitere Ausarbeitung des Lösungsansatzes erleichterte – im Vergleich zu Bedingungen, in denen das Quellproblem entweder kontextfrei war oder einem zum Zielproblem unähnlichen Kontext aufwies. Während in dieser Arbeit der Einfluss von Oberflächenähnlichkeiten unter Konstanthaltung der strukturellen Ähnlichkeit zwischen Quell- und Zielproblem untersucht wurde, konnte

Novick (1988) zeigen, dass oberflächlich ähnliche Quellprobleme auch bei gegebener struktureller Unähnlichkeit zum *mapping* und zum Inferieren der Lösung verwendet werden, so dass es zu negativem Transfer kommt. Diese Befunde stehen in Einklang mit der Annahme von Gick und Holyoak (1987), dass der Abruf lediglich oberflächlich ähnlicher Quellprobleme und der Versuch, aus diesen eine Lösung für das Zielproblem abzuleiten, zu deutlichen Leistungseinbußen führen kann: "Perceived similarity based on surface features, in the absence of structural similarity, sets the stage for negative transfer" (Gick & Holyoak, 1987, S. 17). Außerdem konnte Novick (1988) nachweisen, dass Experten im Gegensatz zu Novizen nur dann keinen negativen Transfer zeigten, wenn ihnen neben einem nur oberflächlich ähnlichen auch ein strukturell ähnliches Quellproblem dargeboten wurde. Wurde hingegen die strukturelle Ähnlichkeit aller Quellprobleme konstant niedrig gehalten, nutzten Experten die lediglich oberflächlich ähnlichen Quellprobleme im gleichen Ausmaß bei der Generierung einer Lösung für das Zielproblem wie Novizen.

Interessanterweise gibt es bei Novick (1988) einen Effekt der Reihenfolge, in der die Quellprobleme präsentiert wurden: Novizen zeigten einen deutlicheren positiven Transfer, wenn ihnen zuletzt das strukturell ähnliche Quellproblem präsentiert wurde im Vergleich zu einer Bedingung, in der das nur oberflächlich ähnliche Quellproblem als letztes Lernbeispiel vor dem Testproblem präsentiert wurde. Die unmittelbare Präsentation eines geeigneten analogen Quellproblems vor dem eigentlichen Zielproblem erhöhte folglich die Wahrscheinlichkeit eines positiven Transfers. Wurde diese Sequenz dagegen durch ein ungeeignetes Quellproblem unterbrochen, sank diese Wahrscheinlichkeit drastisch. Dieser durch die Präsentationsreihenfolge des Lernmaterials hervorgerufene Effekt ließ sich jedoch nur für Novizen nachweisen, während Experten ungeachtet der Präsentationsreihenfolge einen gleichermaßen hohen positiven Transfer zeigten.

Ross (1987, 1989a, b; Ross & Kilbane, 1997) konnte schließlich zeigen, dass Versuchspersonen vor allem so genannte Objektkorrespondenzen zwischen Ziel- und Quellproblem nutzen, um ein *mapping* zwischen den beiden Probleminstanzen herzustellen. Beinhalteten Quell- und Zielproblem die gleichen Objekte und wiesen diese vertauschte funktionale Rollen auf, kam es zu Leistungseinbußen gegenüber Bedingungen, in denen entweder keine Objektähnlichkeiten zwischen Quell- und Zielproblem bestanden oder in denen die Objekte im Zielproblem die gleichen funktionalen Rollen aufwiesen wie im Quellproblem.

Zusammenfassend lässt sich im Hinblick auf die Frage, inwieweit Oberflächenmerkmale auch Prozesse im Anschluss an die Auswahl eines Quellproblems beeinflussen, festhalten, dass Problemlöser oberflächlich ähnliche Quellprobleme beim *mapping* zumindest nicht zurückweisen. Das heißt, sie versuchen nicht, durch Initiierung eines erneuten Abrufprozesses auf strukturell ähnlichere Quellprobleme zu rekurrieren. Stattdessen halten sie an ungeeigneten Quellproblemen auch bei Vorhandensein geeigneterer Quellprobleme fest und nutzen diese zum Inferieren eines Lösungswegs. Ein erfolgreicher analoger Transfer setzt jedoch voraus, dass strukturelle – im Gegensatz zu oberflächlichen – Korrespondenzen zur Konstruktion einer Problemlösung herangezogen werden.

Musterergänzung und Adaption. Ein Gelingen von Musterergänzungs- und Adaptionsprozessen setzt voraus, dass einerseits die Relationen innerhalb von Aufgabenlösungen hinreichend elaboriert werden (Renkl, 1997) und dass andererseits ausreichend Wissen über Anwendungsbedingungen und Funktionen einzelner Lösungsschritte vorliegt, so dass sowohl Ergänzungen relevanter Information als auch Modifikationen des bekannten Lösungswegs vorgenommen werden können.

Eine Adaption der Quellproblemlösung wird dann notwendig, wenn das Zielproblem nicht vollständig isomorph zu einem bekannten Quellproblem ist. Abweichungen in den strukturellen Merkmalen zwischen einem Quellproblem und dem Zielproblem erschweren das Auffinden von strukturellen Entsprechungen beim *mapping* und verhindern vor allem eine einfache Übertragung des Lösungswegs des Quellproblems auf das Zielproblem. Stattdessen wird eine mehr oder weniger umfassende Anpassung des Lösungswegs des Quellproblems an die strukturellen Gegebenheiten des Zielproblems nötig.

Eine wesentliche Ursache für das Nicht-Gelingen dieses Adaptionsschritts kann darin gesehen werden, dass Problemlöser häufig nicht über das nötige Wissen verfügen, um eine Modifikation der bekannten Quellproblemlösung vorzunehmen (Catrambone, 1994, 1995, 1996, 1998). Das heißt, sie wissen nicht, welche Lösungsschritte zur Erreichung welcher Unterziele benötigt werden oder welche Anwendungsbedingungen für die Ausführung eines bestimmten Lösungsschritts gegeben sein müssen (Carbonell, 1986).

Novick und Holyoak (1991) konnten nachweisen, dass selbst bei bekannten numerischen Entsprechungen zwischen einem algebraischen Quellproblem und einem

strukturähnlichen Zielproblem, lediglich 50% der Versuchspersonen in der Lage waren, den Lösungsweg des Quellproblems für das Zielproblem zu adaptieren. Reed, Dempster und Ettinger (1985) zeigten in einer Serie von Experimenten sogar, dass der Schritt der Adaption von Lösungswegen für Problemlöser häufig so große Schwierigkeiten bereitet, dass sie überhaupt nicht von der vorangegangenen Präsentation einer strukturell ähnlichen, aber nicht identischen Beispielaufgabe profitieren.

Novick (1995) präsentierte ihren Versuchspersonen unterschiedliche Testaufgaben, die dazu geeignet waren, Prozesse des *mappings* und der Musterergänzung von Adaptionprozessen empirisch zu trennen. Während Versuchspersonen in ihren Experimenten eine sehr hohe Lösungsrate (88%) bei Aufgaben aufwiesen, die die Fertigkeit zum *mapping* und zur Musterergänzung erfassen sollten, lag die Lösungsrate bei der Aufgabe, mit der die Fähigkeit zur Adaption des Lösungsweges registriert werden sollte, bei lediglich 25%.

Weitere Befunde, die auf die mangelnde Fertigkeit von Versuchspersonen hindeuten, bekannte Lösungswege für die Bearbeitung nicht-isomorpher Probleme zu modifizieren, finden sich in den Arbeiten von Catrambone (1994, 1995, 1996, 1998), Cooper und Sweller (1987), Reed et al. (1990), Reed und Bolstad (1991) oder Sweller und Cooper (1985).

Fazit. Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Nutzung vorangegangener Problemlöseepisoden zur Bearbeitung neuer Aufgaben im Sinne eines analogen Transfers nach der bisherigen Darstellung von der erfolgreichen Bewältigung der verschiedenen Teilprozesse abhängt und sich nicht automatisch als Resultat der Verfügbarkeit entsprechender Wissensbestände einstellt. Da Sequenzeffekte zu einem wesentlichen Anteil auf Transfereffekten aufbauen, ist nur unter den Bedingungen, unter denen ein Wissenstransfer zu erwarten ist, auch mit Sequenzeffekten zu rechnen. Diese Bedingungsanalyse untermauert damit auch die zuvor vorgebrachte Kritik an den in der kognitiven Architektur ACT-R enthaltenen Annahmen zu analogem Problemlösen, indem sie den Widerspruch zwischen der Komplexität und Vielfältigkeit dieses Phänomens einerseits und der in der Architektur vorgenommene Umsetzung desselben andererseits erneut salient werden lässt. Konsequenzen, die sich aus den vorgestellten kognitionswissenschaftlichen Analysen von Lern- und Transferprozessen für Sequenzeffekte ergeben, werden im nächsten Abschnitt zusammenfassend dar-

gestellt und mit entsprechenden Fragestellungen für die eigenen Untersuchungen verknüpft.

3.3 Ableitung von Forschungsfragen zu Sequenzeffekten bei voraussetzungsreichen Aufgaben

Im Folgenden werden auf der Basis des in Abbildung 4 dargestellten integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung Forschungsfragen abgeleitet, die sich für die Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben ergeben und denen in den eigenen Untersuchungen nachgegangen wird. Die Möglichkeit zur Ableitung von Vorhersagen ergibt sich unter anderem durch die kognitionswissenschaftliche Präzisierung, die das aktuelle Modell gegenüber seinem Vorgängermodell aus Kapitel 2 erfahren hat. Dieser erhöhte Präzisionsgrad ist das Resultat der in Kapitel 3 vorgenommenen Analyse mit Hilfe von ACT sowie der Bedingungsanalyse zu analogem Problemlösen, welche auf der Basis entsprechender Theorien und Befunde vorgenommen wurde.

Sequenzeffekte beruhen nach diesem kognitionswissenschaftlich präzisierten Rahmenmodell auf dem Erwerb von Wissen bei der Bearbeitung einer Aufgabe 1 (Lernen), welches dann auf die Bearbeitung einer nachfolgenden Aufgabe 2 angewendet werden kann (Transfer). Sie entstehen dann, wenn die miteinander verglichenen Bearbeitungssequenzen sich in dem Ausmaß unterscheiden, in dem sie einen oder beide Prozesse unterstützen.

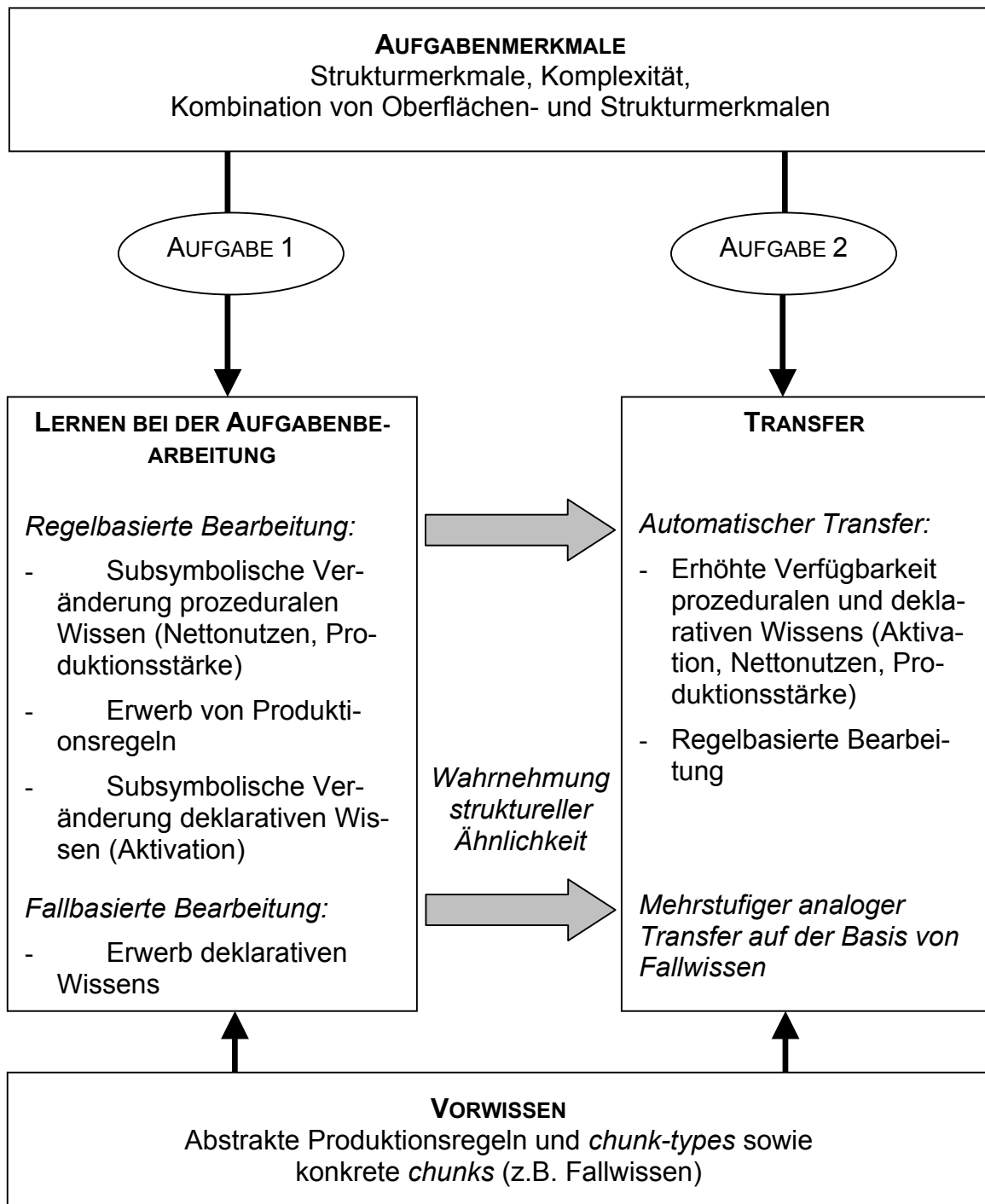


Abbildung 4: Integratives und kognitionswissenschaftlich präzisiertes Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung

Lernen bei der Aufgabenbearbeitung unterscheidet sich nach dem integrativen Rahmenmodell danach, ob die Aufgaben regelbasiert oder fallbasiert bearbeitet werden. Die vorgenommene ACT-Analyse hat gezeigt, dass Lernen als Folge einer Aufgabenbearbeitung durch Anwendung von Produktionsregeln gut beschrieben werden kann.

Damit lassen sich zunächst Lernprozesse bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben beschreiben, die sowohl in einer subsymbolischen Veränderung prozeduralen und deklarativen Wissens als auch im symbolischen Erwerb von Produktionsregeln münden können. Übernimmt man die Auffassung von Koedinger und Anderson (1990), so ist auch die schemabasierte Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben mit Hilfe von ACT beschreibbar. Aufgabenschemata als abstrakte Wissensstrukturen wären dann durch multiple Produktionsregeln repräsentiert, die gemeinsam für die Aufgabenbearbeitung ausgeführt werden müssen. Grundsätzlich stellt dies eine Möglichkeit zur Modellierung schemabasierter Problemlöseprozesse dar, mit der gleichzeitig ein zentrales Problem von ACT umgangen werden kann. Die Darstellung von Aufgabenschemata als abstrakte deklarative Repräsentationen würde nämlich einen Lernmechanismus für den Erwerb von *chunk-types* voraussetzen, der aber bislang nicht in ACT implementiert ist. Aus der Sicht der kognitiven Architektur stellt die regelbasierte Implementation schemabasierter Problemlösens eine elegante Lösung dar, von der allerdings unklar ist, ob damit alle Forschungsbefunde zum Erwerb und zur Anwendung von Aufgabenschemata wirklich abgedeckt werden können.

Die Beschreibung einer fallbasierten Vorgehensweise bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben, bei der eben noch nicht von einem Vorliegen prozeduralen Wissens für die Aufgabenbearbeitung ausgegangen werden kann (Strube & Janetko, 1990), ist in ACT dagegen nicht möglich, da entsprechende Mechanismen fehlen oder unzureichend sind. Fallwissen kann zwar in ACT als konkretes Wissen über Aufgaben und deren Lösungen in Form von *chunks* repräsentiert werden, aber eine Nutzung dieses Wissens für die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben setzt immer eine Wissenskompilierung, d.h. die Transformation deklarativen Wissens in abstrakte Produktionsregeln, voraus. Die in ACT vorgenommenen Versuche, Problemlöseprozesse auf der Basis deklarativen Wissens über einen Analogiemechanismus zu implementieren, erweisen sich nicht als hinreichend, um den vielfältigen Funktionen von Analogie – als Lernmechanismus sowie als Problemlöse- und Transfermechanismus – gerecht werden zu können.

Domänenspezifisches Vorwissen beeinflusst Lernen bei der Aufgabenbearbeitung, indem es vor allem zunächst die Aufgabenbearbeitung selbst determiniert. Vorwissen kann in abstrakter Form vorliegen und betrifft dann vor allem die Existenz von Produktionsregeln. Ebenso kann Vorwissen mit Hilfe von *chunks* repräsentiert werden,

welche sämtliche Fakten enthalten können, die zur Instantiierung der Produktionsregeln benötigt werden und welche auch zur Darstellung von konkretem Fallwissen herangezogen werden können. Mit diesen Annahmen zur Wissensrepräsentation wird jedoch noch nichts über die Möglichkeiten zur Darstellung der *Nutzung* dieses Wissens beim Problemlösen in ACT-R ausgesagt.

Im Hinblick auf die Frage, wie Aufgabensequenzen gestaltet sein müssen, um Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung zu unterstützen, wird im Folgenden als **Untersuchungshypothese 1** davon ausgegangen, dass eine in der Komplexität zunehmende Anordnung der Aufgaben vorteilhaft ist, da die anfängliche Bearbeitung einfacherer Aufgaben den Erwerb von Wissen ermöglicht, welches bei der anschließenden Bearbeitung komplexerer Aufgaben benötigt wird. Mindestens drei Argumente können für diese erste Untersuchungshypothese angeführt werden:

- Erstens ergeben die Untersuchungen zur Bearbeitung von Induktionsaufgaben (Sweller, 1980a, b; Sweller & Gee, 1978) sowie zur Bearbeitung von Algebraaufgaben (Zollman, 1987) deutliche Sequenzeffekte zu Gunsten einer in der Komplexität zunehmenden Aufgabensequenz (vgl. Abschnitt 1.2). Die für Induktionsaufgaben nachgewiesenen Sequenzeffekte werden darauf zurückgeführt, dass einfache Aufgaben die Identifikation relevanter Regeln ermöglichen und dass die Kenntnis dieser Regeln Bearbeitungsprozesse für nachfolgende komplexe Aufgaben erleichtert.
- Zweitens gibt es für die Eignung einer in der Komplexität zunehmenden Anordnung von *Lernaufgaben* zur Vermittlung von Fertigkeiten sowohl theoretische als auch empirische Unterstützung aus der Instruktionspsychologie (Collins et al., 1989; Gagné, 1962, 1965; Gagné & Paradise, 1961; van Merriënboer, 1997, van Merriënboer et al., 2002; Silbert et al., 1981).
- Drittens kann vermutet werden, dass eine in der Komplexität der Aufgaben zunehmende Sequenz einen sinnvolleren Einsatz begrenzter Arbeitsgedächtnisressourcen ermöglicht, indem sie – wie im Folgenden erläutert werden soll – sowohl die kognitive Belastung für Lernprozesse als auch für nachfolgende Problemlöseprozesse reduziert.

Zur Erläuterung des dritten Arguments wird auf die *Cognitive Load* Theorie (Sweller, 1999; Sweller et al., 1998) zurückgegriffen, in der Annahmen zur Begrenzung von Arbeitsgedächtnisressourcen üblicherweise herangezogen werden, um die Effektivität verschiedener Instruktionsbedingungen abzuschätzen.

Die Bearbeitung einfacher Aufgaben sollte mit einer – im Vergleich zu komplexen Aufgaben – geringen aufgabeninhärenten kognitiven Belastung einhergehen (vgl. Kapitel 1; geringer *intrinsic cognitive load*; Sweller et al., 1998; van Merriënboer et al., 2002), so dass gleichzeitig kognitive Ressourcen für Prozesse zur Verfügung stehen, die über das eigentliche Finden einer Aufgabenlösung hinausgehen und die dem Wissenserwerb dienen. Beispielsweise können Problemlöser versuchen, zu einer aufgabenunabhängigen, abstrahierten Formulierung der lösungsrelevanten Eigenschaften zu gelangen, die – losgelöst von der semantischen Einbettung der Aufgabe – leichter auf nachfolgende Aufgaben übertragen werden kann. Ebenso können zusätzliche Elaborationsprozesse eingesetzt werden, um Verknüpfungen des aus der Aufgabenbearbeitung resultierenden Wissens mit dem eigenen Vorwissen zu erstellen. Diese im Hinblick auf den Wissenserwerb förderlichen Abstraktions- und Elaborationsprozesse resultieren in einem so genannten *germane cognitive load* (Sweller et al., 1998) und sind wegen des hier geringen *intrinsic cognitive load* vermutlich nur bei einfachen Aufgaben durchführbar.

Dagegen muss bei komplexen Aufgaben, die durch eine höhere Gedächtnisbelastung z.B. auf Grund einer Vielzahl interagierender Elemente gekennzeichnet sind (hoher *intrinsic cognitive load*), die gesamte kognitive Kapazität für Prozesse zur Lösung der Aufgaben eingesetzt werden. Hier interferiert die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses durch Problemlöseprozesse mit der Möglichkeit eines Lernens bei der Aufgabenbearbeitung. Diese Annahme einer Beeinträchtigung von Lernprozessen durch Problemlöseprozesse konnte bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen zum so genannten *worked example* Effekt bestätigt werden (Cooper & Sweller, 1987; Jelsma, van Merriënboer & Bijstra, 1990; Sweller & Cooper, 1985; Sweller et al., 1998). Dieser Effekt besteht in einer Überlegenheit des Lernens aus ausgearbeiteten Beispielaufgaben, das eine Konzentration der Arbeitsgedächtnisressourcen auf Wissenserwerbsprozesse ermöglicht, gegenüber einem Lernen basierend auf der eigenständigen Bearbeitung von Übungsaufgaben (*learning by doing*; Anzai & Simon, 1979; Sweller & Cooper, 1985; Zhu & Simon, 1987), bei dem es zu der beschriebenen Interferenz kommen kann.

Durch die Bearbeitung einfacher anstelle komplexer Aufgaben am Anfang einer Sequenz wird jedoch nicht nur der Erwerb relevanten Wissens für die Lösung nachfolgender, strukturell ähnlicher Aufgaben unterstützt. Gleichzeitig führt dieser Erwerb von Vorwissen dazu, dass mehr kognitive Ressourcen für Problemlöseprozesse bei

diesen nachfolgenden Aufgaben zur Verfügung stehen. Domänenspezifisches Vorwissen ermöglicht nämlich eine im Hinblick auf die Arbeitsgedächtniskapazität sparsamere Repräsentation der Aufgabe, indem als zusammengehörig wahrgenommene Aufgabeneigenschaften nicht einzeln, sondern als größere bedeutungshaltige Einheiten repräsentiert werden können (*chunking*; Chase & Simon, 1973; DeGroot, 1965; Miller, 1956; Simon & Chase, 1973; Sweller et al., 1998). In ähnlicher Weise wird in den bereits beschriebenen Modellen zum Verstehen von Textaufgaben postuliert, dass Vorwissen in Form von Aufgabenschemata eine Art Schablone liefert, mit deren Hilfe zu bearbeitende Aufgaben bedeutungshaltig und auf das Wesentliche reduziert abgebildet werden können (Cummins et al., 1988; Kintsch, 1998; Kintsch & Greeno, 1985; Nathan et al., 1992; Reusser, 1994; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992). Sowohl die *Cognitive Load* Theorie als auch die Textverstehensmodelle setzen allerdings voraus, dass es bei der Bearbeitung der einfachen Aufgabe zum Erwerb eines Schemas gekommen ist, damit die nachfolgende komplexe Aufgabe auf das Wesentliche komprimiert repräsentiert werden kann. Wurde lediglich Fallwissen erworben, erleichtert dies zwar die Bearbeitung der komplexen Aufgabe, da die Repräsentation der einfachen Aufgabe als Quellproblem dienen kann. Fallwissen ermöglicht aber nicht unbedingt eine im Hinblick auf kognitive Ressourcen sparsamere Aufgabenrepräsentation, welches als typischer Vorteil abstrakter, schematischer Wissensstrukturen angesehen wird.

Zusammenfassend können sich nach diesen Überlegungen Sequenzeffekte zu Gunsten einer in der Komplexität der Aufgaben zunehmenden Sequenz dadurch ergeben, dass diese Sequenz Lernprozesse bei der anfänglichen Bearbeitung einfacher Aufgaben ermöglicht, die ihrerseits auch die Bearbeitung nachfolgender, komplexerer Aufgaben unterstützen. Diese Unterstützung kommt einerseits direkt in der Bereitstellung von lösungsrelevantem Vorwissen zum Ausdruck, kann andererseits aber auch darin bestehen, dass nachfolgende Aufgaben zunächst ressourcensparmer repräsentiert werden können.

Darüber hinaus können Sequenzeffekte aus Unterschieden der Sequenzen im Hinblick auf die Förderung eines Transfers zwischen aufeinander folgenden Aufgaben resultieren. Dieser *Transferprozess* ist davon abhängig, ob bereits erworbenes Wissen bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgabe genutzt werden kann. Die Nützlichkeit von Wissen hängt dabei von der strukturellen Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben ab, so dass positive Transfereffekte umso wahrscheinlicher sein soll-

ten, je größer die strukturelle Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben ist. Während diese aufgabenanalytische, objektive Perspektive zur Erklärung von Transfereffekten bei der Bearbeitung von voraussetzungsarmen Aufgaben hinreichend ist, um den dort stattfindenden – vorwiegend automatischen – Transfer zu beschreiben, gewinnt bei voraussetzungsreichen Aufgaben die subjektive Wahrnehmung von Ähnlichkeiten gegenüber der objektiven Feststellbarkeit struktureller Ähnlichkeiten an Bedeutung. Die Identifikation struktureller Aufgabenähnlichkeiten durch den Problemlöser bildet die entscheidende Voraussetzung dafür, ob überhaupt ein Wissenstransfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben initiiert wird.

Die Analyse von Transferprozessen auf der Basis von ACT ergibt, dass diese kognitive Architektur zur Beschreibung der verschiedenen für die Entstehung von Sequenzeffekten verantwortlich gemachten Transferarten (*low road* versus *high road* Transfer nach Salomon & Perkins, 1989) unterschiedlich gut geeignet ist. Ein automatischer *low road* Transfer kann in ACT relativ erfolgreich dargestellt werden (vgl. Singley & Anderson, 1989) und beruht darauf, dass sowohl prozedurales als auch deklaratives Wissen bei der regelbasierten Bearbeitung nachfolgender Aufgaben besser verfügbar bzw. nutzbar ist. Dies umfasst sowohl das Vorhandensein von Produktionsregeln auf der symbolischen Repräsentationsebene von ACT als aber auch hohe Ausprägungen der Produktionsstärke und des Nettonutzens auf der subsymbolischen Ebene. Die Voraktivierung deklarativen Wissens erleichtert dabei gleichzeitig die Instantiierung der zur Aufgabebearbeitung benötigten Produktionsregeln. Diese Art des Transfers kann einerseits für voraussetzungsarme Aufgaben angenommen werden, ist aber möglicherweise auch für die Beschreibung von Transferprozessen auf der Basis von Aufgabenschemata geeignet – insbesondere wenn diese prozedural implementiert werden (vgl. Koedinger & Anderson, 1990).

Analoge Transferprozesse auf der Basis deklarativer Aufgabenrepräsentationen (*high road* Transfer nach Salomon & Perkins, 1989) stellen dagegen eine bislang nicht zufrieden stellend bewältigte Herausforderung für die ACT-Theorie dar. Die in ACT getroffenen Annahmen zum analogen Transfer sind unvollständig, da sie entscheidende Teilprozesse des analogen Problemlösens wie die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgabenrepräsentationen als Voraussetzung für Transfer nicht spezifizieren und nur einen kleinen Ausschnitt des mehrstufigen Transferprozesses berücksichtigen. Insbesondere ermöglicht ACT damit im Gegensatz zu elaborierten Transfertheorien keine Analyse der Bedingungen, unter denen es zu

einem erfolgreichen analogen Transfer – als eine wesentliche Komponente von Sequenzeffekten bei voraussetzungsreichen Aufgaben – kommt. Das Zustandekommen dieser Bedingungen wird zu einem großen Anteil durch drei Faktoren moderiert, nämlich erstens durch die Ausprägung von Strukturmerkmalen, zweitens durch die Kombination von Oberflächen- und Strukturmerkmalen und drittens durch das Vorhandensein domänenspezifischen Vorwissens. Diese Faktoren werden auf Grund ihrer großen Bedeutsamkeit für analoge Transferprozesse in den eigenen Untersuchungen hinsichtlich ihrer Relevanz für die Entstehung von Sequenzeffekten berücksichtigt.

Als **Untersuchungshypothese 2** für die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben ergibt sich zunächst aus diesen Überlegungen, dass Aufgabensequenzen, in denen strukturell ähnliche Aufgaben aufeinander folgen, zu besseren Bearbeitungsleistungen führen sollten als Sequenzen, in denen dies nicht der Fall ist. Gleichzeitig wird aber in einer **Untersuchungshypothese 3** erwartet, dass dieser Vorteil einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz nicht – wie z.B. bei der Bearbeitung elementarer Reiz-Reaktions-Aufgaben im Taskshift-Paradigma – automatisch zum Tragen kommt, sondern nur dann, wenn entsprechende Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten eingesetzt werden.

Diese Vorhersagen lassen bislang die Rolle von Oberflächenmerkmalen unberücksichtigt. Das Zusammenspiel von Oberflächenmerkmalen und Strukturmerkmalen kann jedoch interessante Auswirkungen auf mögliche Sequenzeffekte haben, die Gegenstand von **Untersuchungshypothese 4** und **5** sind: Werden oberflächlich ähnliche Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien nacheinander bearbeitet, ist es möglich, dass Lösungswege zwischen diesen Aufgaben fälschlicherweise übertragen werden (Novick, 1988). Eine solche Aufgabensequenz sollte also gegenüber einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz eher zu schlechten Bearbeitungsleistungen führen, indem sie einen negativen Transfer nahe legt (Untersuchungshypothese 4). Die gegenteilige Vorhersage (Untersuchungshypothese 5) kann jedoch getroffen werden, wenn man mögliche Kontrasteffekte mit berücksichtigt, die sich aus einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Aufgabensequenz ergeben können. Durch eine hohe Übereinstimmung der Oberflächenmerkmale werden bestehende strukturelle Abweichungen salienter gemacht, so dass sie vom Problemlöser leichter identifiziert werden können (vgl. ‚near miss‘; Gick & Paterson, 1992; Ross & Kilbane, 1997; Winston, 1975, 1980). Diese mehrdeutige Rolle der Kombination

von Oberflächenmerkmalen und Strukturmerkmalen bildet ebenfalls einen Gegenstand der eigenen Untersuchungen.

Schließlich zeigen verschiedene Studien, dass verschiedene Teilprozesse analogen Transfers durch das domänenspezifische Vorwissen der Problemlöser moderiert werden. Hohes domänenspezifisches Vorwissen unterstützt die adäquate Repräsentation des Zielproblems, die Auswahl eines strukturell ähnlichen Quellproblems, die Konstruktion lösungsrelevanter Korrespondenzen zwischen Quell- und Zielproblem und fördert deren Nutzung zum Inferieren einer Zielproblemlösung sowie mögliche Ergänzungs- und Adaptationsprozesse.

Hinsichtlich der Bedeutung domänenspezifischen Vorwissens für die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben können wiederum zwei gegensätzliche **Untersuchungshypothesen 6** und **7** aufgestellt werden. Einerseits bildet domänenspezifisches Vorwissen im Sinne der obigen Darstellung eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen analogen Transfer und sollte daher einen entscheidenden Faktor in der Entstehung von Sequenzeffekten darstellen. Nach dieser Auffassung sollten Sequenzeffekte vor allem für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen zu beobachten sein, während Personen mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen nicht über die für einen analogen Transfer notwendigen Kenntnisse verfügen und daher ein Sequenzeffekt ausbleibt (Untersuchungshypothese 6).

Andererseits kann vermutet werden, dass gerade Personen mit geringem Vorwissen von günstigen Problemlösebedingungen wie einer die Bearbeitung erleichternden Aufgabensequenz profitieren, während Problemlöser mit hohem domänenspezifischem Vorwissen möglicherweise ungünstige Problemlösebedingungen durch den Einsatz geeigneter Bearbeitungsstrategien kompensieren können (Untersuchungshypothese 7). Entsprechende Annahmen finden sich in instruktionspsychologischen Ansätzen zur Sequenzierung konzeptueller *Lerninhalte* (Brown, 1970; Buckland, 1968; Levin & Baker, 1963; Niedermeyer, Brown & Sulzen, 1969). So postuliert beispielsweise Brown (1970, S. 41): „Sequence effects depend upon the interindividual learner’s ability. High-ability learners are more able to overcome the effects of a poor sequence than low-ability learners.“ Entsprechend konnte Buckland (1968) zeigen, dass nur Lerner mit niedrigem Vorwissen von einer geplanten Anordnung des Lernmaterials profitierten, während sich bei Lernern mit hohem Vorwissen keine Leis-

tungsunterschiede zwischen einer zufälligen Abfolge des Lernmaterials und einer geplanten Sequenz ergaben.

Es wird erwartet, dass die eigenen Untersuchungen eine Antwort auf die Frage zu geben vermögen, welche der beiden gegensätzlichen Hypothesen mit Bezug auf eine mögliche Abhängigkeit von Sequenzeffekten vom domänenspezifischen Vorwissen der Problemlöser zutrifft.

Zusammenfassend betreffen die Untersuchungen zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben die folgenden Aspekte:

- die Bedeutung der Anordnung von Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität und nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit
- der Einfluss von Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten
- die Bedeutung der Kombination von Oberflächen- und Strukturmerkmalen
- die Moderation von Sequenzeffekten durch das domänenspezifische Vorwissen

Bislang noch nicht angesprochen wurde der zweite Fragenkomplex, der mit dieser Arbeit verbunden ist und der sich auf die Rolle der Aufgabensequenzierung bezieht. Wenn sich Bearbeitungssequenzen in der resultierenden Performanz unterscheiden, dann kann eine Möglichkeit zur Verbesserung der eigenen Leistung bei der Bearbeitung multipler Aufgaben darin bestehen, eine günstige Bearbeitungsreihenfolge zu wählen, bei der die eben spezifizierten Lern- und Transferprozesse in besonderer Weise genutzt werden. Im folgenden Kapitel soll diese strategische Nutzung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben erörtert werden. Dort werden einerseits die Bedingungen für einen spontanen Einsatz von Aufgabensequenzierung im Sinne einer metakognitiven Problemlösestrategie aufbauend auf der in Kapitel 3 vorgenommenen kognitionswissenschaftlichen Analyse von Sequenzeffekten erörtert. Andererseits wird dargestellt, welche kognitiven Voraussetzungen gegeben sein müssen, damit diese Aufgabensequenzierungen mit Leistungsverbesserungen einhergehen.

4. Möglichkeiten der strategischen Nutzung von Sequenzeffekten durch Aufgabensequenzierung

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, inwieweit Problemlöser Sequenzeffekte, die als Resultat des Zusammenwirkens von Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und von Transfer entstehen können, strategisch nutzen, um ihre Problemlöseleistung zu optimieren. Existieren Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben, dann kann es sich bei der Aufgabenbearbeitung als sinnvoll erweisen, eine günstige Bearbeitungssequenz für zu bearbeitende Aufgaben festzulegen, die dem Problemlöser sowohl Möglichkeiten zum Lernen bei der Aufgabenbearbeitung als auch zur Übertragung von Wissen auf andere Aufgaben eröffnet. Beispielsweise kann es nach dieser Auffassung von Aufgabensequenzierung als Problemlösestrategie sinnvoll sein, eine vorgegebene, mit komplexen Aufgaben beginnende Abfolge dahingehend zu verändern, dass zunächst einfache vor komplexeren Aufgaben des gleichen Typs bearbeitet werden können.

Da bislang weder empirische Untersuchungen noch theoretische Überlegungen zur Aufgabensequenzierung existieren, werden zunächst in Abschnitt 4.1 mögliche Ähnlichkeiten sowohl zu anderen Konzepten aus der kognitiven Psychologie als auch aus der Künstlichen Intelligenz diskutiert. Ein Ergebnis dieser Erörterungen ist jedoch, dass es zwar in einigen Aspekten ähnlich erscheinende Konzepte gibt, dass aber deren Anwendbarkeit auf die vorliegende Fragestellung aus unterschiedlichen Gründen nur bedingt hilfreich erscheint. Es erscheint daher sinnvoller, erneut auf die Erkenntnisse zum analogen Problemlösen zurückzugreifen, um Aufgabensequenzierung in Anlehnung an den in entsprechenden Prozessmodellen enthaltenen *retrieval*-Prozess zu konzipieren (Abschnitt 4.2). Dies ermöglicht darüber hinaus eine Beschreibung der Bedingungen, die einerseits für den Einsatz der Strategie (Bereitschaft zur Sequenzierung; Abschnitt 4.2.1) und andererseits für ihre erfolgreiche Ausführung gegeben sein müssen (kognitive Voraussetzungen; Abschnitt 4.2.2). Aus dieser Darstellung werden in Abschnitt 4.3 die Untersuchungsfragen zur Aufgabensequenzierung abgeleitet.

4.1 Die Beziehung von Aufgabensequenzierung zu Metakognition, Planen und *scheduling*

Im Folgenden wird die Sequenzierung mehrerer zu bearbeitender Aufgaben als so genannte metakognitive Problemlösestrategie angesehen, bei der eine inkrementelle Planung bezüglich der Bearbeitungsreihenfolge vorgenommen wird, mit dem Ziel, potenziell für diese Aufgaben vorhandene Sequenzeffekte möglichst optimal zu nutzen. Diese Planung einer Bearbeitungsreihenfolge für eine Menge von Aufgaben ist unter anderem Forschungsgegenstand in der Planung betrieblicher Produktionsabläufe sowie in der Künstlichen Intelligenz und wird dort als *scheduling* bezeichnet. In diesem Abschnitt sollen die Bezüge der Aufgabensequenzierung zu diesen Konzepten – metakognitive Strategien, inkrementelles Planen, *scheduling* – erörtert werden.

Die Aufgabe metakognitiver Strategien oder auch Metakomponenten des Problemlösens besteht darin, kognitive Aktivitäten zur Lösung einer Aufgabe zu planen, deren Ausführung zu kontrollieren und das Ausmaß der Zielerreichung zu bewerten (Brown, 1978; Flavell, 1984; Flavell & Wellman, 1977; Reed et al., 1994). Nach Brown, Bransford, Ferrara und Campione (1983) umfassen metakognitive Fertigkeiten oder Strategien die folgenden Teilaspekte:

These processes include *planning* activities prior to undertaking a problem (predicting outcomes, scheduling strategies, various forms of vicarious trial and error, etc.), *monitoring* activities during learning (testing, revising, rescheduling one's strategies for learning), and *checking* outcomes (evaluating the outcome of any strategic actions against criteria of efficiency and effectiveness).

(Brown et al., 1983, S. 107, Hervorhebungen im Original)

Metakognitive Strategien dienen im Gegensatz zu kognitiven Operatoren, die zur Lösung einer aktuellen Aufgabe eingesetzt werden, nicht der Bearbeitung konkreter Aufgabeninhalte, sondern haben eben diese kognitiven Operatoren zum Inhalt. „Metacognitive strategies are cognitive actions directed at the monitoring of cognitive progress (compared to cognitive strategies applied for making cognitive progress)“ (Kluwe & Friedrichsen, 1985, S. 189).

Die Festlegung einer Bearbeitungssequenz als metakognitive Problemlösestrategie muss nicht vor Beginn der eigentlichen Problemlösung vollständig abgeschlossen sein, vielmehr wird es häufig so sein, dass ausgehend von einer Aufgabe die nächste

zu bearbeitende Aufgabe ausgewählt wird und somit eine inkrementelle Festlegung der Bearbeitungssequenz vorgenommen wird. Diese Auffassung entspricht einer dynamischen Sichtweise, wie sie auch in der Planungsforschung vertreten wird. So gehen Hayes-Roth und Hayes-Roth (1979) in ihrem Ansatz des opportunistischen Planens davon aus, dass Menschen nicht vollständige Sequenzen von Aktionen zur Erledigung mehrerer Aufgaben planen, sondern sich immer nur bis zu bestimmten Entscheidungspunkten „vorarbeiten“ (vgl. Oesterreich, 1981). „We assume that people’s planning activity is largely *opportunistic*. That is, at each point in the progress, the planner’s current decisions and observations suggest various opportunities for plan development. The planner’s subsequent decisions follow up on selected opportunities“ (Hayes-Roth & Hayes-Roth, 1979, S. 276; Hervorhebung im Original).

Zwei Merkmalsgruppen können diesen dynamischen Planungsprozess beeinflussen, nämlich einerseits Merkmale des Kontexts, innerhalb dessen zu planende Aktivitäten ausgeführt werden sollen, und andererseits Eigenschaften der zu planenden Aktivitäten selbst – wie z.B. die relative Komplexität der Aufgaben oder strukturelle Ähnlichkeiten. Während zu dem ersten Aspekt vor allem aus dem Bereich des *scheduling* Erkenntnisse vorliegen, sind Eigenschaften der zu planenden Aktivitäten bislang weitestgehend unberücksichtigt geblieben. Die folgende Darstellung konzentriert sich daher auf den Einfluss kontextueller Merkmale auf den Planungsprozess, wie er im Hinblick auf die Festlegung einer Bearbeitungsreihenfolge stattfindet.

Scheduling wird seit den 50er Jahren in den Bereichen der Produktionsplanung und der Künstlichen Intelligenz untersucht und bezeichnet dort die Planung der Reihenfolge, in der Arbeitsaufträge von einer Arbeitsstation erledigt werden sollen und zwar unter Berücksichtigung der Beanspruchung dieses maschinellen Systems und mit dem Ziel, die Produktionskapazität innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens maximal auszuschöpfen (Baker, 1974; MacCarthy & Wilson, 2001). Beim *scheduling* handelt es sich also um einen Teilaspekt des Planens, der spezifisch auf die Festlegung einer Reihenfolge ausgerichtet ist. Dabei werden vor allem die Auswirkungen kontextueller Randbedingungen (*constraints*) wie die insgesamt für die Erledigung einer Aufgabe zur Verfügung stehende Zeit, Gelegenheitsfenster für Erledigung bestimmter Teilkomponenten einer Aufgabe und die Abstimmung zwischen verschiedenen Ausführungssystemen z.B. bei Unterbrechungen zum Gegenstand der Untersuchung gemacht (Moray, Dessouky, Kijowski & Adapathya, 1991).

Von eher kognitiv orientierten Forschern wird die Bedeutung von *scheduling* als strategische Verhaltenskomponente betont (Moray et al., 1991, S. 610). Dabei wird es angestrebt, unter einer Menge von alternativen Tätigkeitssequenzen diejenige auszuwählen, bei der die Belastung von kognitiven Verarbeitungsressourcen so gering wie möglich gehalten wird (*workload management*). *Scheduling* selber wird als komplexe kognitive Tätigkeit beschrieben, die ihrerseits Ressourcen beansprucht (Hart, 1989). Dabei wird postuliert, dass die Bereitschaft zum *scheduling* davon abhängt, in welchem Verhältnis die damit verbundenen Kosten zu dem antizipierten Nutzen stehen. „Accordingly, the extent to which operators actively schedule tasks may depend on whether or not the expected costs in terms of the cognitive resources required outweigh the expected benefits in terms of minimized workload, maximized performance, or both“ (Andre, Heers & Cashion, 1995, S. 6).

Das Konzept des *scheduling* weist durchaus Ähnlichkeiten zur Aufgabensequenzierung auf, indem auch hier die Festlegung einer möglichst günstigen Bearbeitungssequenz zum Gegenstand der Untersuchung gemacht wird. Ein entscheidender Unterschied zur Aufgabensequenzierung besteht allerdings in der Art der zu lösenden Aufgaben. In der vorliegenden Arbeit sollen Aufgaben untersucht werden, deren Bearbeitungsreihenfolge keinen festen *constraints* unterliegt, d.h. jede der Aufgaben ist grundsätzlich unabhängig von der Frage lösbar, ob zuvor eine bestimmte Aufgabe erfolgreich bearbeitet wurde oder nicht. Für die im Bereich des *scheduling* untersuchten Anforderungen ist dies nicht der Fall – hier unterliegt die Erledigung der Anforderungen z.B. bestimmten hierarchischen Voraussetzungsbeziehungen, d.h. eine Aufgabe muss zuerst bearbeitet werden, da ihr Resultat Ausgangsvoraussetzung für eine andere Aufgabe bildet oder da Gelegenheitsfenster zu ihrer Ausführung zu schließen drohen. Dies bedeutet auch, dass nicht alle möglichen Bearbeitungsreihenfolgen realisierbar sind, vielmehr gibt es für viele Bearbeitungsreihenfolgen Sackgassen, die eine Bearbeitung weiterer Aufgaben unmöglich machen:

A typical AI planning task is to specify an efficient order for carrying out a sequence of actions, such as assembling a piece of equipment. In such a situation some of those actions may preclude the possibility of performing others. A classic example is given in a painting problem: "Paint the ladder and paint the ceiling" (Sacerdoti, 1977). Performing the former forestalls the latter, at least for quite a while.

(Schoenfeld, 1985, S. 132f.)

Auch wenn im Bereich des *scheduling* von Einzelaufgaben und deren sequentieller Erledigung gesprochen wird, sind diese auf Grund dieser zumindest teilweisen Interdependenz und ihrer hierarchischen Organisation eher als Unterziele zur Erreichung eines Gesamtziels zu verstehen. Diese Interdependenz macht es unter anderem notwendig, dass für die meisten untersuchten Planungsaufgaben der Planungsprozess vor Beginn der eigentlichen Aufgabenbearbeitung abgeschlossen sein muss, um Sackgassen zu vermeiden (vgl. Oesterreich, 1981). Diese Tatsache erschwert den Planungsprozess für menschliche Planer, da sämtliche unmittelbaren und entfernten Konsequenzen eines Handlungsschritts zu einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt werden müssen, und sie macht auch den Einsatz dynamischer Planungsansätze (Hayes-Roth & Hayes-Roth, 1979) unmöglich, bei denen nur ein Ausschnitt der gesamten Handlungssequenz geplant wird.

Zusammenfassend kann die Sequenzierung multipler Aufgaben als metakognitive Kontrollstrategie verstanden werden, die im Wesentlichen in einer Planung der Abfolge bei der Bearbeitung multipler Aufgaben besteht. Diese Planung wird als dynamischer Prozess verstanden, der nicht vor Beginn der eigentlichen Aufgabenbearbeitung abgeschlossen sein muss, sondern iterativ bzw. opportunistisch vorgeht. *Scheduling* als ein Teilbereich des Planens weist zwar inhaltliche Ähnlichkeiten zur Aufgabensequenzierung auf, da auch dort die Festlegung einer möglichst optimalen Bearbeitungsreihenfolge zum Untersuchungsgegenstand gemacht wird, ist aber aus mindestens drei Gründen als Modell zur Beschreibung der Aufgabensequenzierung ungeeignet. Erstens berücksichtigen auch zum heutigen Zeitpunkt nur wenige *scheduling*-Ansätze die Bedeutung (kognitiver) Ressourcenbeschränkungen, die für die Beschreibung menschlichen Verhaltens in jedem Fall in Betracht gezogen werden müssen. Beispielsweise ist es unrealistisch, für menschliche Planer davon auszugehen, dass von Anfang an eine Bearbeitungsreihenfolge für sämtliche (Teil-) Aufgaben festgelegt wird (Hayes-Roth & Hayes-Roth, 1979), da dies in der Berücksichtigung einer Anzahl von Handlungsoptionen münden würde, die durch eine kombinatorische Explosion gekennzeichnet ist. Zweitens ist der Problembereich des *scheduling* durch Aufgaben gekennzeichnet, deren Bearbeitungsreihenfolge überwiegend bestimmten Randbedingungen unterliegt, so dass nicht sämtliche Bearbeitungsreihenfolgen realisierbar sind, während im hier interessierenden Kontext der Aufgabensequenzierung angenommen wird, dass die Aufgaben grundsätzlich in jeder beliebigen Reihenfolge lösbar sind. Drittens erweist sich *scheduling* zumindest für die hier interessierenden

Fragestellungen insofern als ungeeignet, als dass dort vornehmlich der Einfluss kontextueller Merkmale untersucht wird, während sich die bisherigen Ausführungen zu Sequenzeffekten und auch die später zu berichtenden Untersuchungen zu Sequenzeffekten und Aufgabensequenzierung auf die Bedeutung von Aufgabenmerkmalen – die strukturelle Ähnlichkeit und relative Komplexität von Aufgaben – konzentrieren.

Aus diesen Gründen wird versucht, eine andere Annäherung an das Konzept der Aufgabensequenzierung vorzunehmen, die den Vorteil hat, dass die bislang gemachten Ausführungen zu analogem Transfer stärker als bislang geschehen in die Analyse einbezogen werden können. Diese Auffassung von Aufgabensequenzierung als vorwärts gerichtetem *retrieval*-Prozess wird im folgenden Abschnitt erörtert.

4.2 Aufgabensequenzierung als vorwärts gerichteter *retrieval*-Prozess

Die Aufgabensequenzierung weist zum *retrieval*-Prozess in klassischen analogen Problemlösemodellen sowohl Ähnlichkeiten hinsichtlich der untersuchten Aufgabenstellungen, hinsichtlich der untersuchten Aufgabenmerkmale als auch hinsichtlich der zugrunde liegenden Prozesse auf. Gesucht wird in beiden Fällen nach Aufgaben, die relativ zu einem Zielproblem einen maximalen Transfer ermöglichen. Während jedoch in klassischen analogen Problemlösemodellen davon ausgegangen wird, dass ein Teil dieser Aufgaben bereits als gelöste Quellprobleme vorliegen, liegt der Fokus der Aufgabensequenzierung auf der Tatsache, dass zu Beginn der Aufgabenbearbeitung alle Aufgaben ungelöst sind. Der strategische Aspekt der Aufgabensequenzierung besteht darin (1) festzulegen, welche Aufgabe als Quellproblem für eine andere Aufgabe fungieren könnte (2) diese Aufgabe zu lösen und (3) bei der Aufgabenbearbeitung erworbenes Wissen zu nutzen, um ein als Zielproblem in Frage kommendes Problem zu lösen. Damit wird die Trennung zwischen Quellproblemen und Zielproblemen aufgelöst, da während der Problemlösephase grundsätzlich jede Aufgabe sowohl als Quellproblem aber auch als Zielproblem für eine andere Aufgabe fungieren kann.

Während der Retrievalprozess in Modellen zum analogen Problemlösen rückwärts gerichtet verläuft, da ausgehend von dem aktuell zu bearbeitendem Zielproblem im Gedächtnis nach einer mentalen Repräsentation gesucht wird, die der aktuellen möglichst strukturähnlich ist, wird bei der Aufgabensequenzierung dagegen eine

vorwärts gerichtete Suche initiiert, die auf die noch zu lösenden Aufgaben ausgerichtet ist. Diese unbearbeiteten Aufgaben können einerseits in ihrer Funktion als potenzielles Zielproblem gesucht werden oder aber auch in ihrer Funktion als potenzielle Quellprobleme. In dem einen Fall wird ausgehend von der gerade gelösten Aufgabe eine strukturell ähnliche Aufgabe gesucht, die einen Wissenstransfer erlaubt und daher sinnvollerweise als nächstes bearbeitet werden sollte. Im anderen Fall wird ausgehend von einer nicht lösbar erscheinenden Aufgabe eine andere, einfachere Aufgabe gesucht, deren – bislang noch nicht vorliegende – Lösung hilfreich bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgabe sein könnte. Die Bearbeitung der einfacheren Aufgabe soll folglich den Erwerb von Wissen ermöglichen, welches seinerseits bei der anschließenden Bearbeitung komplexerer Aufgaben benötigt wird. Eine Aufgabensequenzierung kann demnach entweder primär darauf ausgerichtet sein, solche Sequenzeffekte strategisch zu nutzen, die auf Transferprozesse zurückgehen oder aber Sequenzeffekte, die vor allem auf einer Eignung der Aufgabenabfolge für Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung beruhen.

Diese zuletzt genannte Perspektive der Suche nach noch nicht gelösten, potenziellen Quellproblemen findet sich typischerweise in so genannten *metakognitiven Strategietrainings* zur Unterstützung analogen Transfers wieder (Polya, 1949; Schoenfeld, 1985; Wickelgren, 1974). Schoenfeld (1985) empfiehlt zur Verbesserung mathematischer Problemlösefertigkeiten, analoges Problemlösen als allgemeine Bearbeitungsstrategie unabhängig von einer konkret zu lösenden Aufgabe zu trainieren. Insbesondere sollten Problemlöser angeleitet werden, im Falle von Schwierigkeiten bei der Bearbeitung einer Aufgabe nach bereits gelösten ähnlichen Aufgaben bzw. nach noch unbearbeiteten, aber leichter erscheinenden Aufgaben zu suchen, deren Lösung als Ausgangspunkt für die Herleitung des Lösungsweges für die aktuelle Aufgabe herangezogen werden kann: „If you cannot solve the original problem, try first to solve an easier, related problem. Look for known solutions to related problems“ (Schoenfeld, 1985, S. 86). Schoenfeld bezeichnet diese und andere Vorgehensweisen als Problemlöseheuristiken – „strategies and techniques for making progress on unfamiliar or nonstandard problems; rules of thumb for effective problem solving“ (Schoenfeld, 1985, S. 15).

Seine Überlegungen zum Training analogen Denkens als allgemeine Problemlösestrategie in der Mathematik gehen auf Polyas „Schule des Denkens“ (deutsch: 1949; englisch: 1945 *How to solve it*) zurück. Polya geht davon aus, dass das Anfer-

tigen eines Plans zur Lösung einer Aufgabe einen wesentlichen Bestandteil des eigentlichen Problemlöseprozesses bei der Bearbeitung mathematischer Aufgaben ausmacht. Um einen Plan zu formulieren, empfiehlt Polya – unabhängig von der Art der zu lösenden Aufgabe – sich an einigen Leitfragen zu orientieren, die sehr stark auf ein analogiebasiertes Vorgehen verweisen:

- Hast Du die Aufgabe schon früher gesehen? Oder hast Du dieselbe Aufgabe in einer wenig verschiedenen Form gesehen?
- *Kennst Du eine verwandte Aufgabe? ...*
- *Betrachte Die Unbekannte!* Und versuche, Dich auf eine Dir bekannte Aufgabe zu besinnen, die dieselbe oder eine ähnliche Unbekannte hat.
- *Hier ist eine Aufgabe, die der Deinen verwandt und schon gelöst ist. Kannst Du sie gebrauchen? ...*
- Wenn Du die vorliegende Aufgabe nicht lösen kannst, so versuche zuerst eine verwandte Aufgabe zu lösen. Kannst Du Dir eine zugänglichere verwandte Aufgabe denken? ... Eine analoge Aufgabe?

(Polya, 1949, S. II, Hervorhebungen im Original)

Die Effektivität eines auf diesen Empfehlungen aufbauenden Strategietrainings konnte Schoenfeld (1979, 1985) in einer experimentellen Untersuchung nachweisen. Versuchspersonen der Experimentalgruppe erhielten ein zweiwöchiges Training bezüglich der Verwendung von fünf Problemlöseheuristiken, wobei eine dieser Heuristiken darin bestand, zunächst eine einfachere Aufgabe mit weniger Variablen zu betrachten und zur Lösung der aktuellen Aufgabe heranzuziehen. Die Trainingsphase bestand aus 20 mathematischen Aufgaben, jeweils vier dieser Trainingsaufgaben wurden zur Illustration einer Heuristik eingesetzt. Während der Trainingsphase stand den Versuchspersonen eine Liste mit Beschreibungen der fünf Heuristiken zur Verfügung. Die Versuchspersonen mussten jeweils eine Trainingsaufgabe selbst bearbeiten und erhielten nach deren Bearbeitung die korrekte Lösung sowie eine Beschreibung, in der die Anwendung der jeweiligen trainierten Problemlöseheuristik auf die aktuelle Aufgabe illustriert wurde. Die Kontrollgruppe musste ebenfalls die 20 Trainingsaufgaben bearbeiten und erhielt auch eine Beschreibung der jeweils korrek-

ten Lösung. Teilnehmern dieser experimentellen Bedingung wurden jedoch keinerlei Information bezüglich der Problemlöseheuristiken präsentiert. Sowohl vor der Trainingsphase als auch im Anschluss mussten alle Versuchspersonen fünf Testaufgaben lösen. Diese Testaufgaben waren so konstruiert, dass jeweils eine Problemlöseheuristik besonders geeignet war, um eine der Aufgaben zu lösen, so dass die Lösungsraten für die einzelnen Testaufgaben eine Aussage über die Effektivität der jeweiligen Strategie erlaubten. Die Experimentalgruppe hatte während der Testphase die Möglichkeit, auf die Liste mit der Beschreibung der Problemlöseheuristiken zurück zu greifen und wurde in der Problemlöseinstruktion explizit zu deren Nutzung ermuntert.

Eine Analyse der Differenzen zwischen der Anzahl korrekter Lösungen bzw. korrekter Lösungsansätze zum ersten Messzeitpunkt (Vortest) und den Lösungsraten im Anschluss an die Bearbeitung der Übungsaufgaben ergab eine statistisch bedeutsame Überlegenheit zugunsten der hinsichtlich des Einsatzes von Problemlöseheuristiken trainierten Experimentalgruppe. Schoenfeld (1985) selbst berichtet allerdings über verschiedene Faktoren, die eine Interpretierbarkeit der sehr deutlichen Performanzsteigerung in der trainierten Gruppe einschränken. Neben der Tatsache, dass die Trainierbarkeit von Strategien lediglich für eine sehr geringe Anzahl von Personen ($n = 4$) mit hohen mathematischen Fertigkeiten nachgewiesen worden sei, sei weiterhin problematisch, dass nicht einmal in diesem sehr stark kontrollierten Laborsetting zu gewährleisten gewesen sei, dass die Versuchspersonen auch Gebrauch von den trainierten Strategien machten:

Despite having the list of strategies in front of them all the times, and despite being reminded periodically of its existence, the students in the experimental group still jumped impulsively into (sometimes relevant, sometimes irrelevant) solution attempts on a number of the posttest problems.

(Schoenfeld, 1985, S. 210f.)

Schoenfeld folgert aus dieser Beobachtung, dass gerade in nicht-experimentellen Settings neben dem Wissen über einzelne Problemlöseheuristiken auch Kontrollwissen vermittelt werden müsse, welches unter anderem in Hintergrundwissen über die Anwendungsbedingungen und Ausführung einzelner Heuristiken bestehe.

Unabhängig von der Frage, ob der Einsatz von Problemlöseheuristiken trainierbar ist oder nicht, stellen die Arbeiten von Polya (1949) und Schoenfeld (1985) eine Er-

weiterung der herkömmlichen Sichtweise auf analoges Problemlösen dar. In traditionellen Theorien zum analogen Transfer (vgl. Abschnitt 2.2.1 sowie 3.2) wird von einer relativ strikten Trennung zwischen Quellproblemen einerseits und zu lösenden Zielproblemen andererseits ausgegangen. Diese Quellprobleme liegen als mentale Repräsentationen gelöster Aufgaben vor, und eine wesentliche Aufgabe des Problemlösers besteht darin, aus dieser begrenzten Menge an potenziellen Quellproblemen eines zur Lösung des Zielproblems heranzuziehen.

Bei Polya (1949) und Schoenfeld (1985) deutet sich dagegen an, dass nicht nur die Möglichkeit besteht, ausgehend von einem Zielproblem ausschließlich in der Menge der Repräsentationen bereits gelöster Aufgaben nach einem geeigneten Quellproblem zu suchen. Stattdessen kann der Problemlöser darüber hinaus auch gezielt nach einer noch nicht gelösten, einfacheren, aber analogen Aufgabe suchen oder diese selbst konstruieren, kann diese zunächst lösen und kann schließlich deren Lösung als Quellproblem für die ursprünglich nicht lösbare Aufgabe nutzen.

Für den Fall, dass solche „Hilfsaufgaben“ nicht eigens konstruiert werden, sondern dass diese sich unter der Menge der sowieso zu bearbeitenden Aufgaben befinden, besteht nach dieser Auffassung eine strategische Option des Problemlösers darin, eine günstige Bearbeitungsreihenfolge für die Menge der zu bearbeitenden Aufgaben zu bestimmen. Diese Bearbeitungsreihenfolge sollte so gewählt werden, dass zwischen den Aufgaben bestehende Komplexitätsrelationen und analoge Transferbeziehungen optimal genutzt werden. Dieser strategischen Nutzung von Sequenzeffekten mit dem Ziel der Optimierung der Problemlöseperformanz entspricht die Aufgabensequenzierung.

Die Konzipierung von Aufgabensequenzierung in Anlehnung an den Retrievalprozess beim analogen Transfer birgt einen entscheidenden Vorteil in sich: Befunde, die im Zusammenhang mit analogen Problemlöseprozessen gefunden wurden, können als Ausgangspunkt genutzt werden, um Untersuchungshypothesen für den Bereich der Sequenzierung zu entwickeln. Insbesondere können Annahmen darüber getroffen werden, unter welchen Bedingungen eine Aufgabensequenzierung mit dem Ziel einer Leistungsverbesserung vorgenommen wird (Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung) und welche kognitiven Voraussetzungen auf Seiten des Problemlösers gegeben sein müssen, damit es zu einer erfolgreichen Aufgabensequenzierung kommt.

4.2.1 Voraussetzungen für die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung

Die Bereitschaft zur Sequenzierung sollte im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängen: Erstens müssen Problemlöser davon überzeugt sein, dass die Reihenfolge, in der eine Menge von Aufgaben bearbeitet wird, einen Einfluss auf die Problemlöseleistung hat, d.h. es muss eine positive Einschätzung des Nutzens einer deliberativen Festlegung einer Bearbeitungsreihenfolge vorliegen. Zweitens sollte dieser antizipierte Nutzen größer sein als die erwarteten Kosten, die mit dem Sequenzierungsverhalten einhergehen können. Kosten entstehen vor allem durch die Suche nach einer strukturell ähnlichen Aufgabe, während der mögliche Gewinn aus der Nutzung von Transferbeziehungen bei der Bearbeitung der Aufgaben resultiert. Inwieweit überhaupt versucht wird, zu bearbeitende Aufgaben in eine günstige Bearbeitungsreihenfolge zu bringen, sollte also von dem damit antizipierten Kosten-Nutzen Verhältnis abhängen.

Dieser Einfluss antizipierter Kosten-Nutzen Kalkulationen ist bereits im Zusammenhang mit dem Initiierungsproblem beim analogem Transfer diskutiert worden. Der antizipierte Nutzen für eine Aufgabensequenzierung sollte vor allem davon abhängen, inwieweit Problemlöser von der Nützlichkeit einer analogen Problemlösemethode überzeugt sind. Verschiedene Untersuchungen haben hier zeigen können, dass analoges Problemlösen als Methode oftmals nicht eingesetzt wird, da Problemlöser die Nützlichkeit von bereits gemachten Problemlöseerfahrungen unterschätzen (vgl. Kapitel 3.2; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Hayes & Simon, 1977; Perfetto et al., 1974; Weisberg et al., 1978; Novick, 1988). Zusätzlich haben Novick (1988) sowie Reed und Mitarbeiter (Reed et al., 1974) darauf hingewiesen, dass auch – im Vergleich zu dem antizipierbaren Nutzen – übermäßige Kosten (z.B. hoher Zeitaufwand), die bei der Suche nach potenziell geeigneten Quellproblemen im Gedächtnis entstehen, die Wahrscheinlichkeit des Einsatzes analoger Problemlösemethoden reduzieren. In ähnlicher Weise kann dafür argumentiert werden, dass eine deliberative Sequenzierung zu lösender Aufgaben nur im Falle eines günstig ausfallenden Kosten-Nutzen Verhältnisses vorgenommen wird.

Um diese Bereitschaft zur deliberativen Aufgabensequenzierung untersuchen zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen hinsichtlich der Untersuchungsmethode gegeben sein. Für die Untersuchung des Sequenzierungsverhaltens von Prob-

lemlösern lassen sich zwei Ausgangssituationen unterscheiden: Erstens können die zu bearbeitenden Aufgaben ungeordnet vorliegen, so dass in jedem Fall eine Bearbeitungsreihenfolge festgelegt werden muss. In diesem Fall können jedoch keine Ergebnisse hinsichtlich der Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung und deren Abhängigkeit von Kosten-Nutzen Überlegungen erzielt werden, da sich der Problemlöser in jedem Fall für eine Bearbeitungsreihenfolge entscheiden muss.

Zweitens können die Aufgaben in einer vorgegebenen Reihenfolge präsentiert werden, und die Analyse des Sequenzierungsverhaltens kann sich darauf beziehen, inwieweit Problemlöser diese Präsentationsreihenfolge bei der Bearbeitung beibehalten oder ob sie die Aufgaben in eine von der vorgegebenen Sequenz abweichende Bearbeitungsreihenfolge bringen. In dieser Situation sind Aktivitäten zur Festlegung einer Bearbeitungsreihenfolge zumindest dann im beobachtbaren Verhalten sichtbar, wenn Problemlöser von der vorgegebenen Reihenfolge der Aufgaben abweichen. Im Falle des Beibehaltens der vorgegebenen Abfolge ist allerdings weiterhin unklar, ob Versuchspersonen auf eine Sequenzierung verzichten, weil sie den strategischen Nutzen nicht erkennen bzw. diesen niedriger einschätzen als die mit einer Umsequenzierung verbundenen Kosten oder weil sie nach einer Prüfung der Qualität der Sequenz zu dem Schluss gekommen sind, dass diese als Bearbeitungsreihenfolge geeignet ist. Diesem methodischen Nachteil der mangelnden Interpretierbarkeit steht jedoch ein Vorteil gegenüber. Gibt man Problemlösern unterschiedliche Präsentationsreihenfolgen vor, die entweder auf Grund empirischer Befunde oder aber aufbauend auf aufgabenanalytischen Überlegungen a priori als günstig bzw. ungünstig charakterisiert wurden, so erlaubt die Analyse der Häufigkeit von Abweichungen von diesen Präsentationssequenzen eine Aussage darüber, ob Problemlöser in der Lage sind, ihr Verhalten an die Qualität einer vorgegebenen Sequenz zu adaptieren. Dieses Vorgehen wird in den Untersuchungen, die im zweiten Teil dieser Arbeit vorgestellt werden, gewählt.

Ob Problemlöser die Qualität einer Sequenz überhaupt korrekt einschätzen können und ob sie darauf aufbauend eine – im Vergleich zu der Präsentationsreihenfolge – geeignetere Bearbeitungsreihenfolge festlegen können, hängt davon ab, inwieweit sie bestimmte kognitive Voraussetzungen erfüllen.

4.2.2 Kognitive Voraussetzungen für eine erfolgreiche Aufgabensequenzierung

Kognitive Voraussetzungen für die Festlegung einer günstigen Bearbeitungsreihenfolge umfassen einerseits Wissen darüber, wie günstige und weniger günstige Sequenzen beschaffen sind und welche Aufgabenmerkmale zu berücksichtigen sind sowie andererseits das Erkennen der Ausprägungen der relevanten Aufgabenmerkmale bei den in Frage stehenden Aufgaben.

Inwieweit Problemlöser über Wissen über die Qualität verschiedener Aufgabensequenzen und die dabei wesentlichen Eigenschaften verfügen, ist unklar. Diesem Mangel an empirischer Evidenz bezüglich dieses Aspekts stehen allerdings zahlreiche Belege gegenüber, die darauf hinweisen, dass Problemlöser große Schwierigkeiten haben, relevante Aufgabenmerkmale zu erkennen und von irrelevanten Oberflächenmerkmalen zu unterscheiden und dass die Fähigkeit zur Einschätzung relevanter Aufgabenmerkmale stark vorwissensabhängig ist (vgl. Kapitel 3.2):

- Insbesondere Novizen repräsentieren Aufgaben oft überwiegend anhand von Oberflächenmerkmalen und nutzen diese Oberflächenmerkmale anstelle der lösungsrelevanten Strukturmerkmale, um Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben zu bestimmen (Chi et al., 1981, 1982; Hardiman et al., 1989; Quilici & Mayer, 1996; Reed, 1987; Schoenfeld & Herrmann, 1982; Silver, 1981).
- Bei der Suche nach geeigneten Quellproblemen werden daher häufig Quellprobleme abgerufen, die dem Zielproblem nur oberflächlich ähnlich sind, während strukturähnliche Quellprobleme nur unzureichend genutzt werden (Catrambone & Holyoak, 1989; Hesse, 1991a, b; Hesse & Klecha, 1990; Holyoak & Koh, 1987; Keane, 1987; Reed et al., 1990; Ross, 1984, 1987, 1989; Ross & Kennedy, 1990; Novick, 1988). Diese übermäßige Ausrichtung an Oberflächenmerkmalen beim Abruf von Quellproblemen interagiert mit dem Vorwissen der Problemlöser (Novick, 1988; Reed et al., 1990).

Es kann also einerseits davon ausgegangen werden, dass für eine erfolgreiche Aufgabensequenzierung hinreichend domänenspezifisches Vorwissen zur Verfügung stehen muss, um strukturell ähnliche Aufgaben zu erkennen. Dieses Erkennen struktureller Ähnlichkeiten ist Voraussetzung für die Festlegung einer geeigneten Bearbeitungsreihenfolge. Zusätzlich sollte die Festlegung einer geeigneten Bearbeitungsreihenfolge erschwert sein, wenn Oberflächen- und Strukturmerkmale der Aufgaben

gegenläufige Ausprägungen aufweisen, d.h. wenn oberflächlich ähnliche Aufgaben unterschiedliche Strukturmerkmale aufweisen. In diesem Fall wählen vermutlich vor allem Problemlöser mit geringem Vorwissen eine Bearbeitungsreihenfolge, bei der oberflächlich ähnliche Aufgaben aufeinander folgen. Wird versucht, Lösungswege zwischen diesen strukturell unähnlichen Aufgaben zu übertragen, sollte ein negativer Transfer beobachtbar sein.

4.3 Ableitung von Forschungsfragen zur Sequenzierung voraussetzungsreicher Aufgaben

Ausgehend von den bislang angestellten Überlegungen zur Sequenzierung voraussetzungsreicher Aufgaben ergeben sich verschiedene Forschungsfragen. Diese sind stark explorativer Natur, da der Autorin keine empirischen oder theoretischen Arbeiten zu diesem Thema bekannt sind. Vor allem der aktuelle Kenntnisstand zum analogen Problemlösen liefert jedoch eine gewisse Orientierung zur Formulierung verschiedener Erwartungen im Hinblick auf das Sequenzierungsverhalten und performanzbezogene Effekte einer Aufgabensequenzierung. Insbesondere ermöglicht es die in Kapitel 3.2 vorgenommene Analyse der Bedingungen für einen erfolgreichen Transfer, Vorhersagen bezüglich potenzieller moderierender Faktoren wie z.B. domänenspezifisches Vorwissen zu machen.

Sequenzierungsverhalten. Erstens soll sowohl mit Hilfe einer Fragebogenstudie als auch durch experimentelle Untersuchungen die Vermutung geprüft werden, dass Problemlöser eine Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie in Betracht ziehen bzw. nutzen, indem sie von einer vorgegebenen Präsentationssequenz der Aufgaben abweichen und für die Bearbeitung der Aufgaben eine andere Sequenz wählen (**Untersuchungshypothese 8**).

Zweitens soll geprüft werden, ob diese Bereitschaft zur Sequenzierung durch die Qualität der vorgegebenen Präsentationssequenz beeinflusst wird. Es wird erwartet, dass eine Umsequenzierung der Aufgaben vor allem dann vorgenommen wird, wenn es sich bei der Präsentationssequenz um eine ungünstige Aufgabenabfolge handelt (**Untersuchungshypothese 9**). Nur dann sollte nach den vorgestellten Überlegungen eine Aufgabensequenzierung sinnvoll sein, da in der Präsentationssequenz eine optimale Nutzung potenzieller Transferbeziehungen zwischen Aufgaben nicht möglich ist.

Drittens wird vermutet, dass das Sequenzierungsverhalten durch das domänen-spezifische Vorwissen der Problemlöser moderiert wird (**Untersuchungshypothese 10**): Wenn man davon ausgeht, dass überwiegend Problemlöser mit hohem Vorwissen über die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten verfügen (vgl. Chi et al., 1981; 1982; Hardiman et al., Novick, 1988; Schoenfeld & Herrmann, 1982; Silver, 1981), dann sollten vor allem diese Personen ein strategisch adaptives Verhalten zeigen, indem sie vor allem bei einer ungünstigen Präsentationssequenz der Aufgaben umsequenzieren. Dagegen ist zu vermuten, dass Personen mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen ihr Sequenzierungsverhalten nicht an der Qualität der Präsentationssequenz ausrichten, da ihnen die kognitiven Voraussetzungen zur Beurteilung der Eignung einer Sequenz für analoge Problemlöseprozesse fehlen.

Viertens wird erwartet, dass das Sequenzierungsverhalten – ähnlich wie der *retrieval*-Prozess beim analogen Transfer – ungünstig durch oberflächliche Ähnlichkeiten strukturell voneinander abweichender Aufgaben beeinflusst wird. Dabei wird angenommen, dass Problemlöser vor allem dann eine Aufgabensequenzierung vornehmen, wenn oberflächlich unähnliche Aufgaben aufeinander folgen (**Untersuchungshypothese 11**). In diesem Fall kann es sein, dass versucht wird, eine Aufgabensequenz herzustellen, in der oberflächlich ähnliche Aufgaben aufeinander folgen – ungeachtet der Tatsache, dass diese Aufgaben möglicherweise keine strukturellen und damit für die analoge Problemlösung entscheidenden Gemeinsamkeiten zueinander aufweisen.

Auswirkungen des Sequenzierungsverhaltens auf die Performanz. Die zentrale Untersuchungshypothese der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die Aufgabensequenzierung ist, dass eine durch den Problemlöser vorgenommene (Um-) Sequenzierung der zu bearbeitenden Aufgaben zu besseren Problemlöseleistungen führt als wenn die Präsentationssequenz zur Bearbeitung der Aufgaben beibehalten wird. Diese Rahmenhypothese kann im Hinblick auf drei potenzielle moderierende Faktoren ausdifferenziert werden.

Erstens ist zu erwarten, dass performanzbezogene Sequenzierungseffekte durch die Qualität der Präsentationssequenz moderiert werden (**Untersuchungshypothese 12**): Leistungsverbesserungen durch eine Umsequenzierung der Aufgaben sollten vor allem dann zu beobachten sein, wenn von einer – für analoge Problemlöseprozesse – ungünstigen Präsentationssequenz abgewichen wird. Dagegen sind keine

Leistungsvorteile oder aber sogar Performanzeinbußen bei der Umsequenzierung einer günstigen Präsentationssequenz zu erwarten.

Ebenso wird zweitens angenommen, dass eine Umsequenzierung, die an Oberflächenähnlichkeiten orientiert ist und ungeachtet struktureller Unterschiede der Aufgaben erfolgt, mit Performanzeinbußen einhergeht, da sie auf der fälschlichen Annahme beruht, dass Oberflächenmerkmale für die Aufgabenlösung relevant sind (**Untersuchungshypothese 13**).

Drittens sollten sich Interaktionen mit dem domänenspezifischen Vorwissen der Problemlöser ergeben (**Untersuchungshypothese 14**), da eine erfolgreiche Aufgabensequenzierung die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben voraussetzt, die in hinreichendem Ausmaß vermutlich nur bei Versuchspersonen mit hohem Vorwissen vorhanden ist. Leistungsvorteile einer Aufgabensequenzierung gegenüber dem Beibehalten einer Präsentationssequenz für die Aufgabenbearbeitung sollten daher erstens nur bei der Umsequenzierung einer ungünstigen Präsentationssequenz und zweitens vor allem für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen nachweisbar sein. Vorhergesagt wird folglich eine Interaktion der drei Faktoren Sequenzierungsverhalten, Präsentationssequenz und Vorwissen im Hinblick auf die Problemlöseperformanz.

Da davon ausgegangen wird, dass sowohl das Sequenzierungsverhalten als auch performanzbezogene Effekte dieses Sequenzierungsverhaltens durch die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Aufgabenähnlichkeiten moderiert wird, wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten einen Einfluss auf die interessierenden Variablen haben (**Untersuchungshypothese 15**).

Diese Fragestellungen bilden den Gegenstand einer Fragebogenstudie sowie sechs experimenteller Untersuchungen, deren Ergebnisse im zweiten Teil der Arbeit beschrieben werden.

In Kapitel 5 werden zunächst die Ergebnisse einer Fragebogenstudie berichtet, in der Studierende aufgefordert wurden, Fragen zu ihren Sequenzierungsstrategien und zu ihrer Einschätzung hinsichtlich der Existenz von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung multipler mathematischer Aufgaben zu beantworten. In Kapitel 6 werden Befunde aus einer Serie von drei Experimenten dargestellt, in der Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung algebraischer Textaufgaben analysiert wurden. In dieser Experimentalserie wurde vor allem der Frage nachgegangen, welchen Ein-

fluss das Zusammenspiel von Oberflächen- und Strukturmerkmalen der zu bearbeitenden Aufgaben auf die interessierenden Effekte hat. Schließlich werden in Kapitel 6 die Ergebnisse von drei weiteren Untersuchungen berichtet, in denen Sequenzeffekte und Effekte der Sequenzierung von Aufgaben in einem Teilbereich der Wahrscheinlichkeitstheorie (Kombinatorik) untersucht wurden. In diesen Untersuchungen wurden die strukturelle Ähnlichkeit sowie die relative Komplexität der Aufgaben zueinander systematisch variiert.

5. Sequenzeffekte und Aufgabensequenzierung – eine Fragebogenstudie

In dieser Studie wurden Studierende mit Hilfe eines selbst konzipierten Fragebogens gebeten, Fragen zu ihrem Sequenzierungsverhalten bei der Bearbeitung mathematischer Aufgaben zu beantworten und anzugeben, ob ihrer Meinung nach die Reihenfolge, in der multiple Aufgaben bearbeitet werden, einen Einfluss auf die Leistung hat bzw. welche Sequenzen sich als besonders geeignet erweisen würden. Mit dieser Fragebogenstudie sollte zunächst geklärt werden, inwieweit Problemlöser überhaupt eine eigenständige Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie in Betracht ziehen und ob sie von einer Existenz von Sequenzeffekten beim Problemlösen ausgehen – als Voraussetzung für die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung (vgl. Kapitel 4).

Bei den Befragten handelte es sich um 127 Studierende (98 weiblich, 29 männlich) unterschiedlicher Fachrichtungen der Universität des Saarlandes und der Georg-August-Universität Göttingen, die gebeten wurden, den Fragebogen, welcher zu Beginn verschiedener Lehrveranstaltungen verteilt wurde, auszufüllen. Der überwiegende Anteil der Teilnehmenden bestand dabei aus Studierenden der Psychologie (56 % der Gesamtstichprobe) und Lehramtsstudierenden (33%). Das Durchschnittsalter betrug 23,9 Jahre. Die Studierenden erhielten keinerlei Entschädigung für das Ausfüllen des Fragebogens, da dieses in der Regel nur wenige Minuten in Anspruch nahm.

Ihnen wurde mitgeteilt, dass es Ziel der Fragebogenuntersuchung sei, Einschätzungen ihres eigenen Problemlöseverhaltens bei der Bearbeitung mathematischer Aufgaben zu erhalten. Für jede der sechs Fragen wurden verschiedene Antwortalternativen vorgegeben, zusätzlich gab es bei zwei Fragen die Möglichkeit, eine eigene Antwort zu formulieren.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt für die einzelnen Fragen getrennt. Die Reihenfolge der Ergebnispräsentation entspricht jedoch nicht der Abfolge der Fragen im Fragebogen. Dort wurde die hier zuerst präsentierte Frage zur Existenz von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung abschließend gestellt, um einen Einfluss auf die Beantwortung der Fragen zum Sequenzierungsverhalten möglichst gering zu halten.

Mit dieser am Ende des Fragebogens gestellten Frage sollte Aufschluss darüber gewonnen werden, ob Problemlöser davon ausgehen, dass die Reihenfolge der Aufgabebearbeitung einen Einfluss auf die Performanz hat und welche Bearbeitungssequenzen sich aus ihrer Sicht als geeignet erweisen würden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 6

6. Stelle Dir nun vor, Du könntest die Reihenfolge bei der Bearbeitung mehrerer Aufgaben nicht selbst bestimmen, sondern diese wäre beispielsweise durch den Lehrer vorgegeben. Bei welcher der unten beschriebenen Bearbeitungsreihenfolgen würdest Du die beste Leistung erbringen?	Antworthäufigkeiten in % (N = 127)
a. Die Leistung ist unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge - in allen Bearbeitungsreihenfolgen resultiert die gleiche Leistung.	7,1%
b. Die Leistung ist dann am besten, wenn Aufgaben, die mit einem ähnlichen Lösungsprinzip bearbeitet werden müssen, nacheinander folgen.	7,1%
c. Die Leistung ist dann am besten, wenn sich Aufgaben mit unterschiedlichen Lösungsprinzipien abwechseln.	0,8%
d. Die Leistung ist dann am besten, wenn zuerst leichte Aufgaben und dann schwerere Aufgaben bearbeitet werden müssen - unabhängig von der Art des jeweils zu verwendenden Lösungsprinzips.	16,5%
e. Die Leistung ist dann am besten, wenn zuerst schwere Aufgaben und dann leichtere Aufgaben bearbeitet werden müssen - unabhängig von der Art des jeweils zu verwendenden Lösungsprinzips.	0%
f. Die Leistung ist dann am besten, wenn Aufgaben, die mit einem ähnlichen Lösungsprinzip bearbeitet werden müssen, nacheinander folgen und gleichzeitig innerhalb jedes Blocks von Aufgaben, die mit einem ähnlichen Lösungsprinzip bearbeitet werden müssen, zunächst leichte und dann schwerere Aufgaben präsentiert werden müssen.	65,4%
g. Die Leistung ist dann am besten, wenn Aufgaben, die mit einem ähnlichen Lösungsprinzip bearbeitet werden müssen, nacheinander folgen und gleichzeitig innerhalb jedes Blocks von Aufgaben, die mit einem ähnlichen Lösungsprinzip bearbeitet werden müssen, zunächst schwere und dann leichtere Aufgaben präsentiert werden müssen.	3,1%

Nur ein geringer Anteil der Befragten war der Überzeugung, dass die Problemlöseperformanz unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge ist (7,1%). Die Mehrheit ging davon aus, dass sich nach strukturellen Merkmalen geblockte Sequenzen, bei

denen innerhalb einer Aufgabenkategorie die Aufgaben nach zunehmender Komplexität angeordnet sind, als besonders effektiv erweisen (65,4%). Zusätzlich gab eine Gruppe von Personen (16,5%) an, dass die Qualität einer Bearbeitungssequenz unabhängig vom Einfluss struktureller Ähnlichkeiten sei und dass sie lediglich durch die Anordnung der Aufgaben von leicht nach schwer bestimmt werde. Dieser Nachweis, dass Problemlöser von einer Existenz von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung ausgehen, bietet eine entscheidende Voraussetzung für die Durchführung empirischer Untersuchungen zur Aufgabensequenzierung.

Mit der im Fragebogen am Anfang präsentierten Frage sollte die Vorgehensweise bei Beginn der Bearbeitung einer Menge mathematischer Aufgaben z.B. im Rahmen einer Klausur erfasst werden (Tabelle 8).

Tabelle 8: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 1

1. Wenn ich mehrere Mathematikaufgaben zu bearbeiten habe z.B. im Rahmen einer Klausur, dann	Antworthäufigkeiten in % (N = 127)
a. beginne ich sofort mit der Bearbeitung der obersten Aufgabe, ohne mir die anderen Aufgaben anzugucken.	13,4%
b. lese ich mir zunächst alle Aufgaben gründlich durch und fange danach mit der Bearbeitung der obersten Aufgabe an.	26,0%
c. wähle ich eine Aufgabe per Zufall aus.	0%
d. lese ich mir zunächst alle Aufgaben gründlich durch und suche mir dann eine Aufgabe aus, mit der ich beginnen möchte.	47,2%
e. lese ich mir zunächst alle Aufgaben gründlich durch und lege dann eine Reihenfolge fest, in der ich die Aufgaben bearbeiten werde.	11,0%
f. lese ich mir zunächst alle Aufgaben gründlich durch und lege dann eine Reihenfolge fest, in der ich die Aufgaben bearbeiten werde und bestimme zusätzlich, wie viel Zeit ich für die Bearbeitung jeder Aufgabe investieren werde.	2,4%

Nur wenige Personen gaben an, sofort mit der Bearbeitung der ersten Aufgabe zu beginnen, ohne die anderen Aufgaben anzusehen (13,4%). Die übrigen 86,6% der Befragten berichteten von sich, zunächst alle Aufgaben durchzulesen und dann entweder mit der ersten Aufgabe zu beginnen (26%) oder sich eine Aufgabe für die Bearbeitung auszuwählen (60,6%). Von den zuletzt genannten 60,6 Prozent bestätigten nur wenige Personen die aufwändige Strategie, für alle Aufgaben eine Bearbeitungsreihenfolge und gegebenenfalls sogar noch die aufzuwendende Zeit festzulegen.

Dies entspricht der in Kapitel 4 getroffenen Annahme, dass eine Aufgabensequenzierung eher iterativ erfolgt und nicht bereits vor Beginn der eigentlichen Aufgabebearbeitung vollständig abgeschlossen sein muss.

Wurde diese Frage mit Antwortalternative (a), (b) oder (c) beantwortet, wurden die Befragten aufgefordert, mit Frage 4 weiterzumachen. Wurde bei Frage 1 die Antwortalternative (d), (e) oder (f) angegeben, sollte die Bearbeitung des Fragebogens bei Frage 2 fortgesetzt werden. Die Antworthäufigkeiten für die Fragen 2 und 3 beziehen sich demnach nur noch auf 77 der 127 Befragten, nämlich auf diejenige Untergruppe, die angegeben hatte, von der Präsentationsreihenfolge der Aufgaben abzuweichen und eigenständige Sequenzierung vorzunehmen. In Frage 2 wurden die Befragten aufgefordert, anzugeben, nach welchen Kriterien sie die erste zu bearbeitende Aufgabe auswählen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 2

2. Wenn ich eine erste Aufgabe zur Bearbeitung auswähle, wähle ich	Antworthäufigkeiten in % (N = 77)
a. die Aufgabe, die mir am leichtesten erscheint bzw. zu der mir sofort eine mögliche Lösung einfällt.	84,4%
b. die Aufgabe, die mir am schwersten erscheint.	1,3%
c. die Aufgabe, die vermutlich sehr wenig Zeit und Konzentration in Anspruch nehmen wird.	5,2%
d. die Aufgabe, die vermutlich sehr viel Zeit und Konzentration in Anspruch nehmen wird.	3,9%
e. irgendeine Aufgabe.	0%
f. die Aufgabe, die _____ (bitte das Auswahlkriterium beschreiben)	5,2%

Erwartungsgemäß würde die überwiegende Mehrzahl der Befragten diejenige Aufgabe für den Bearbeitungsbeginn auswählen, die ihnen am leichtesten erscheint bzw. für die ihnen sofort eine Lösung einfällt. 5,2 Prozent der befragten Personen gaben ein eigenes Auswahlkriterium an: Eine Person beschrieb, sie würde diejenige Aufgabe auswählen, die „mir als Basisaufgabe erscheint, auf die [sic] andere Aufgaben aufbauen.“ Diese Antwort ist ein sehr gutes Beispiel für eine vorwärts gerichtete Aufgabensequenzierung, bei der zwischen verschiedenen Aufgaben bestehende Bezüge hinsichtlich Aufgabenähnlichkeit und Komplexität berücksichtigt werden und diese Transferbeziehungen genutzt werden, um andere Aufgaben zu lösen (Polya, 160

1949; Schoenfeld, 1985). Eine weitere Person gab als Auswahlkriterium eine Kombination der Antwortalternativen (a) und (c) an („die Aufgabe, die mir am leichtesten erscheint und wenig Zeit und Konzentration in Anspruch nimmt“). Person 3 bezog den möglichen Nutzen der Aufgabe mit ein und würde als erste zu bearbeitende Aufgabe diejenige auswählen, die „eine angemessene/mittlere Zeit x Nutzen Funktion hat.“ Person 4 würde mit derjenigen Aufgabe beginnen, die „mir am leichtesten fällt (a), außer es gibt eine Aufgabe, die zeitlich sehr, sehr viel Raum einnimmt und viele Punkte gibt.“ Es gab folglich eine – allerdings verschwindend geringe – Anzahl von Personen, die eine sehr stark reflektierte Entscheidung bei der Bestimmung der Erstaufgabe vornehmen würden. Die überwiegende Mehrheit behauptete jedoch von sich, dass sie sich an der Aufgabenschwierigkeit der zu bearbeitenden Aufgaben orientieren würde.

Die Aufgabenschwierigkeit determiniert auch die Auswahl der nachfolgend zu bearbeitenden Aufgaben (Frage 3; Tabelle 10), wobei für diese Entscheidung von einem Teil der Befragten auch zusätzlich strukturelle Ähnlichkeiten zu der zuvor bearbeiteten Aufgabe mit ins Kalkül gezogen wurden. Nur wenige Personen (6,5%) gaben im Fragebogen an, ihre Auswahl an oberflächlichen Ähnlichkeiten auszurichten. Sechs Personen spezifizierten eigene Auswahlkriterien und würden die Aufgabe zur weiteren Bearbeitung auswählen, die

- „am ähnlichsten ist und eventuell darauf aufbaut“
- „als nächstes in der Reihenfolge kommt (alles andere braucht viel Zeit)“
- „ich in der festgelegten Reihenfolge an 2. Stelle gesetzt habe“
- „eine mittlere/angemessene Zeit x Nutzen Funktion hat“
- „am meisten Punkte bringt und zu lösen scheint“
- „mir am leichtesten fällt (a), außer es gibt eine Aufgabe, die zeitlich sehr, sehr viel Raum einnimmt und viele Punkte gibt.“

Tabelle 10: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 3

3. Wenn ich eine Aufgabe auswähle, nachdem ich bereits eine Aufgabe bearbeitet habe, nehme ich als nächstes	Antworthäufigkeiten in % (N = 77)
a. die Aufgabe, die mir von den noch nicht bearbeiteten Aufgaben am leichtesten erscheint bzw. zu der mir sofort eine mögliche Lösung einfällt.	58,4%
b. die Aufgabe, die mir von den noch nicht bearbeiteten Aufgaben am schwersten erscheint.	0%
c. die Aufgabe, die der zuvor bearbeiteten Aufgabe am ähnlichsten bezüglich des zu verwendenden Lösungsprinzips ist.	23,4%
d. die Aufgabe, die der zuvor bearbeiteten Aufgabe am unähnlichsten bezüglich des zu verwendenden Lösungsprinzips ist.	0%
e. die Aufgabe, die der zuvor bearbeiteten Aufgabe am ähnlichsten bezüglich des Erscheinungsbildes ist, z.B. bezüglich (bitte angeben) <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="256 869 1082 952">• der Form der Aufgabenstellung (z.B. Textaufgabe versus Gleichung). <li data-bbox="256 958 1082 1099">• des Kontextes (z.B. Aufgaben, bei denen es um die Berechnung von Durchschnittsgeschwindigkeiten geht versus solche Aufgaben, bei denen die Konzentration von Flüssigkeiten bestimmt werden soll). <li data-bbox="256 1106 1082 1144">• _____ (bitte angeben). 	6,5% n = 1 n = 3
f. die Aufgabe von den noch nicht bearbeiteten Aufgaben, die vermutlich sehr wenig Zeit und Konzentration in Anspruch nehmen wird.	2,6%
g. die Aufgabe von den noch nicht bearbeiteten Aufgaben, die vermutlich sehr viel Zeit und Konzentration in Anspruch nehmen wird.	0%
h. irgendeine Aufgabe.	1,3%
i. die Aufgabe, die _____ (bitte das Auswahlkriterium beschreiben)	7,8%

Drei der Personen benannten damit ein Auswahlkriterium, welches sie bereits bei Frage 2 spezifiziert hatten. In diesen freien Antworten überwog außerdem das Kriterium des Nutzens, der mit der Bearbeitung einer bestimmten Aufgabe verbunden ist.

Nach diesen Selbstauskünften wählt die Mehrheit der Befragten eine eigene Bearbeitungsreihenfolge, wobei Kriterien zur Auswahl von zu bearbeitenden Aufgaben vor allem die Aufgabenschwierigkeit und zu einem geringeren Ausmaß die strukturelle Ähnlichkeit zu bereits bearbeiteten Aufgaben darstellten. Bis zu diesem Punkt lässt

sich also festhalten, dass Personen eine Aufgabensequenzierung vornehmen, bei der die zuvor spezifizierten Kriterien berücksichtigt werden.

Mit Frage 4 wurde das Ziel verfolgt, Aufschluss über die Häufigkeit der Verwendung von Analogie als Problemlösestrategie zu erhalten (Tabelle 11). Die angegebenen Häufigkeiten beziehen sich auf die Gesamtstichprobe (N = 127).

Tabelle 11: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 4

4. Wenn ich eine Aufgabe bearbeite,	Antworthäufigkeiten in % (N = 127)
a. denke ich darüber nach, ob ich vorher schon eine ähnliche Aufgabe bearbeitet habe, deren Lösung mir bei der aktuellen Aufgabe nützlich sein könnte.	70,9%
b. konzentriere ich mich nur auf die Bearbeitung dieser Aufgabe, ohne über andere Aufgaben nachzudenken.	29,1%

Diesen Angaben zufolge suchen 70,9% nach einer ähnlichen Aufgabe, deren Lösung für die Bearbeitung der aktuellen Aufgabe nützlich sein könnte. Dieser hohe Prozentsatz ist sicherlich zu einem großen Anteil auch durch das Antwortformat sowie Antworttendenzen im Sinne einer positiven Selbstdarstellung verursacht. Das heißt, vielen Personen wird die Nützlichkeit eines analogen Vorgehens beim Problemlösen bekannt sein, und sie werden sich bei dieser Art von Befragung als Nutzer dieser Strategie darstellen. Die Häufigkeit des Einsatzes analoger Problemlösemethoden in einer konkreten Problemsituation wird daher eher niedriger liegen, eine Annahme, die in Einklang mit experimentellen Befunden steht, nach denen in der Regel ein seltener spontaner Einsatz von Analogie zu verzeichnen ist (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Keane, 1987).

Auffallend ist, dass gerade bei der Konfrontation mit Schwierigkeiten beim Lösen einer Aufgabe nur ca. ein Viertel der Befragten Analogie als Möglichkeit zur Überwindung dieser Schwierigkeiten ansah (Frage 5; Tabelle 12).

Tabelle 12: Antworthäufigkeiten in Prozent für Frage 5

5. Wenn ich merke, dass ich eine Aufgabe nicht lösen kann,	Antworthäufigkeiten in % (N = 127)
a. suche ich mir eine leichtere Aufgabe zur Bearbeitung aus.	4,7%
b. suche ich nach einer ähnlichen Aufgabe, die ich bereits gelöst habe und versuche deren Lösung zu nutzen, um die Aufgabe zu bearbeiten.	21,3%
c. überspringe ich diese Aufgabe und hoffe, dass mir später noch etwas einfällt.	74,0%

Die überwiegende Mehrheit gab an, bei Schwierigkeiten die Aufgabe zu überspringen und zu hoffen, dass eine Lösung der Aufgabe zu einem späteren Zeitpunkt möglich sein werde. Dies widerspricht verschiedenen Überlegungen (Holyoak, 1985; Polya, 1949; Schoenfeld, 1985), wonach analoges Problemlösen besonders dann nützlich sein sollte, wenn sich eine aktuelle Aufgabe als nicht lösbar erweist.

Die beschriebene Fragebogenstudie liefert erste Anhaltspunkte für verschiedene Aspekte, die für die Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten von Bedeutung sind. Erstens lässt sich zeigen, dass Problemlöser von einer Abhängigkeit der Problemlöseperformanz von der Reihenfolge, in der eine Menge mathematischer Aufgaben bearbeitet wird, ausgehen. Dabei werden solche Bearbeitungssequenzen als leistungsförderlich eingeschätzt, in denen die zu bearbeitenden Aufgaben entweder ausschließlich nach ihrer Komplexität von leicht nach schwer angeordnet sind oder in denen zusätzlich zur Aufgabenkomplexität eine Anordnung nach der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgaben vorgenommen wird. Zweitens gibt eine Großzahl der Problemlöser an, eine eigene Bearbeitungsreihenfolge für eine Menge von Aufgaben zu wählen. Die Auswahl der am Anfang zu bearbeitenden Aufgabe wird dabei diesen Selbstauskünften zufolge vor allem durch die Aufgabenschwierigkeit bestimmt, so dass ein Beginn mit leicht zu lösenden Aufgaben bevorzugt wird. Die Auswahl nachfolgender Aufgaben für die Bearbeitung wird ebenfalls an der Aufgabenschwierigkeit der Aufgaben ausgerichtet, zusätzlich bedeutsam – wenn auch in geringerem Ausmaß – ist die strukturelle Ähnlichkeit zu vorangegangenen Aufgaben. Das heißt, es werden solche Aufgaben ausgewählt, die der gerade gelösten Aufgabe möglichst ähnlich sind. Die Tatsache, dass Problemlöser sowohl von der Existenz von Sequenzeffekten als auch von der Möglichkeit der strategischen Beeinflussung der Problemlöseperformanz durch Sequenzierung überzeugt sind, bildet eine ent-

scheidende Voraussetzung für die experimentelle Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten. Gleichzeitig ergibt sich damit eine erste Bestätigung der Untersuchungshypothese 8, in der angenommen wurde, dass Problemlöser eine Aufgabensequenzierung in Betracht ziehen, um ihrer Performanz zu optimieren.

Die Interpretierbarkeit der Fragebogendaten ist allerdings durch mindestens zwei Faktoren eingeschränkt. Erstens kann bei der Art der Formulierung der Fragen nicht ausgeschlossen werden, dass bestimmte Antworten nahe gelegt wurden bzw. dass durch die Vorgabe von Antwortalternativen das Spektrum möglicher Antworten deutlich eingeschränkt war. Allerdings machten nur wenige der Befragten von der Möglichkeit Gebrauch, eine freie Antwort zu formulieren, und die geringe Anzahl freier Antworten bestand im Wesentlichen aus Kombinationen der vorgegebenen Antwortalternativen, was für die Eignung dieser Alternativen spricht. Ein zweiter, die Interpretierbarkeit der Daten einschränkende Faktor besteht darin, dass verschiedene Antwortalternativen einer positiven Selbstdarstellung dienlich waren, so dass es hier zu Verzerrungen im Urteilsverhalten gekommen sein kann. Die Fragebogendaten sollen aus diesen Gründen nur als Unterstützung für die im Vordergrund stehenden experimentellen Untersuchungen dienen, die in den beiden nachfolgenden Kapiteln dargestellt werden.

6. Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung von Textaufgaben aus der Algebra

Die nachfolgend beschriebene Experimentalserie³ umfasst drei Experimente, in denen der Frage nachgegangen wurde, wie Sequenz- und Sequenzierungseffekte durch eine systematische Variation der Oberflächen- und Strukturmerkmale der zu bearbeitenden Aufgaben beeinflusst werden.

- In Experiment 1 wurden dabei vor allem die Hypothesen 4 und 5 untersucht, in denen die mehrdeutige Rolle von Oberflächenmerkmalen bei der Aufgabenbearbeitung aufgegriffen wurde, um zwei widersprüchliche Vorhersagen zur Entstehung von Sequenzeffekten für entweder nach Strukturmerkmalen oder aber nach Oberflächenmerkmalen geblockte Aufgabenabfolgen zu formulieren. Danach kann die sequenzielle Bearbeitung oberflächlich ähnlicher, aber strukturell verschiedener Aufgaben entweder zu einem negativen Transfer zwischen diesen Aufgaben und damit zu Performanzbeeinträchtigungen führen (Untersuchungshypothese 4) oder aber in Leistungsverbesserungen resultieren, da die hohe Oberflächenähnlichkeit vorhandene strukturelle Differenzen salient macht (Untersuchungshypothese 5).
- In Experiment 2 wurde vor allem den Untersuchungshypothesen 8, 11, 12 und 13 nachgegangen, in denen Vorhersagen zur generellen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung sowie zum Einfluss von Oberflächenähnlichkeiten aufeinander folgender Aufgaben auf das Sequenzierungsverhalten und auf mit einer Aufgabensequenzierung potenziell einhergehende Performanzsteigerungen getroffen werden.
- Experiment 3 beschäftigte sich dagegen vornehmlich mit den Untersuchungshypothesen 2, 3, 4 und 6, wonach Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Aufgabenabfolge auftreten sollten (Untersuchungshypothese 2 bzw. 4). Diese sollten allerdings nur dann nachweisbar sein, wenn Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten der Aufgaben eingesetzt werden (Untersuchungshypothese 3) bzw.

³ Ein Teil der in diesem Kapitel berichteten Befunde wurde publiziert in: Scheiter, K. & Gerjets, P. (in press). Sequence effects in solving knowledge-rich problems: The ambiguous role of surface similarities. In R. Alterman & D. Kirsh (Eds.), *Proceedings of the 25th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ: Erlbaum.

wenn Problemlöser über Wissen bezüglich dieser Aufgabenähnlichkeiten verfügen (Untersuchungshypothese 6). Das ursprüngliche Bestreben, in diesem Experiment auch Fragestellungen zur Aufgabensequenzierung zu untersuchen, musste auf Grund der geringen Sequenzierungsbereitschaft aufgegeben werden.

Bei den in dieser ersten Experimentalserie zu bearbeitenden Aufgaben handelt es sich um Textaufgaben aus dem Bereich der Algebra. Algebra-Textaufgaben sind in der Forschung zum analogen Problemlösen und zum Lernen aus Beispielen intensiv eingesetzt worden (Cummins, 1992; Novick, 1988; Reed, 1984, 1987), wobei insbesondere auch der Rolle von Oberflächenmerkmalen bei der Bearbeitung solcher Aufgaben nachgegangen wurde (Blessing & Ross, 1996). Algebra-Textaufgaben weisen im Hinblick auf diese Merkmale Besonderheiten auf, die sie für die aktuellen Untersuchungsfragen in spezieller Weise geeignet erscheinen lassen.

Die Gestaltung der Aufgaben orientierte sich an den von Blessing und Ross (1996) verwendeten Materialien. Es wurden Aufgaben aus drei verschiedenen Aufgabenkategorien verwendet, die im angloamerikanischen Sprachraum als *work*, *interest* und *distance problems* bezeichnet werden (vgl. Mayer, 1981). In der vorliegenden Arbeit werden diese Aufgabenkategorien als 'Arbeitsaufgaben', 'Zinsaufgaben' und 'Distanzaufgaben' charakterisiert. Eine typische Aufgabe für jede der drei Kategorien ist in Tabelle 13 wiedergegeben. Es handelt sich dabei um die Lernbeispiele, die in der hier dargestellten Untersuchungsserie verwendet wurden. Eine Besonderheit dieser Art von Aufgaben liegt darin, dass jede der Aufgabenkategorien nicht nur mit einer bestimmten mathematischen Aufgabenstruktur, sondern auch mit einer typischen semantischen Einbettung, d.h. mit bestimmten Oberflächenmerkmalen, assoziiert ist, die sich bereits an der Bezeichnung der Aufgabenkategorien ablesen lässt:

- Bei *Arbeitsaufgaben* geht es typischerweise darum, die Zeit zu bestimmen, die für die Erledigung einer bestimmten Arbeit benötigt wird, wenn zwei Personen mit unterschiedlichen Arbeitsraten zusammen arbeiten.
- *Zinsaufgaben* sind dadurch gekennzeichnet, dass eine vorgegebene Summe in zwei oder mehrere Teilsummen zerlegt wird, die mit unterschiedlichen Zinssätzen angelegt werden. Gegeben ist der am Ende eines bestimmten Zeitraums erzielte Gewinn, aus dem auf die Größe der Teilsummen geschlossen werden muss.

- Bei *Distanzaufgaben* wird aus einer gegebenen zurückgelegten Strecke und der Durchschnittsgeschwindigkeit die Fahrdauer bestimmt, um auf dieser Basis zu berechnen, mit welcher Durchschnittsgeschwindigkeit sich ein weiteres Fahrzeug auf einer anderen Strecke im gleichen Zeitraum fortbewegt hat.

Tabelle 13: Lernbeispiele für die drei Aufgabenkategorien
mit den für die Lösung benötigten Grundformeln

ARBEITSAUFGABE

Friederike benötigt 5 Stunden, um einen Zaun zu streichen, während ihr Bruder Tom die gleiche Arbeit in 7 Stunden erledigt. Wie lange brauchen die beiden zum Streichen des Zauns, wenn sie zusammen arbeiten?

$$\text{Rate}_1 * \text{Zeit} + \text{Rate}_2 * \text{Zeit} = 1 = \text{Leistung}$$

ZINSAUFGABE

Friederike und Tom haben von ihrer Tante 5000 DM geerbt. Sie investieren die gesamte Summe zu ungleichen Anteilen in zwei Aktienfonds. Der eine Fond hat eine Verzinsung von 8%, während der zweite Fond eine Rendite von 6% pro Jahr erbringt. Am Ende des Jahres haben die beiden 360 DM Gewinn gemacht. Welche Summe haben sie in den Fond mit 8% Verzinsung investiert?

$$\text{Zuwachs} = \text{Veränderungsrate}_1 * x + \text{Veränderungsrate}_2 * (\text{Gesamtmenge} - x)$$

DISTANZAUFGABE

Die Geschwister Friederike und Tom fahren zur gleichen Zeit los, um sich bei ihren Eltern zu treffen. Friederike muss dafür 420 km fahren und Tom hat eine Strecke von 385 km vor sich. Beide kommen gleichzeitig bei den Eltern an. Friederike fuhr mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 Kilometern pro Stunde (km/h). Wie schnell fuhr Tom?

$$\text{Mittlere Leistung}_1 = \text{Gesamtleistung}_1 / (\text{Gesamtleistung}_2 / \text{mittlere Leistung}_2)$$

Auch wenn jede Aufgabenkategorie mit einer bestimmten semantischen Einbettung assoziiert ist, ist für die Bearbeitung das zugrunde liegende abstrakte Lösungsprinzip entscheidend, welches in Tabelle 13 durch die zur Lösung anzuwendende Gleichung wiedergegeben ist. Diese Gleichungen und die ihnen zugrunde liegende mathematische Aufgabenstruktur sind jedoch nicht auf Aufgaben mit einer bestimmten semantischen Einbettung beschränkt, sondern können auch für Aufgaben mit einer anderen, d.h. atypischen, semantischen Einbettung zutreffen. Von dieser Möglichkeit der unabhängigen Manipulierbarkeit der mathematischen Aufgabenstruktur einerseits und der thematischen Einbettung andererseits wurde in der vorliegenden Untersu-

chungsserie Gebrauch gemacht. In diesen Untersuchungen erhielten die Versuchspersonen zunächst ein Booklet mit den Lernbeispielen sowie jeweils einer ausgearbeiteten Lösung für jede der Beispielaufgaben, in der die Verwendung der Gleichung illustriert wurde (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Ausgearbeitetes Lösungsbeispiel für Arbeitsaufgaben

Friederike benötigt 5 Stunden, um einen Zaun zu streichen, während ihr Bruder Tom die gleiche Arbeit in 7 Stunden erledigt. Wie lange brauchen die beiden zum Streichen des Zauns, wenn sie zusammen arbeiten?

Schritt 1: Aufgaben dieses Typs werden gelöst, indem man zunächst die Leistung pro Stunde (Arbeitsrate) der beteiligten Personen bestimmt, d.h. die Leistung, die jede der Personen allein in einer Stunde erbringt.

$$\text{Rate} = \text{erbrachte Leistung} / \text{benötigte Zeit in Stunden } (h)$$

Da Friederike 5 Stunden benötigt, um den ganzen Zaun zu streichen, schafft sie in einer Stunde $1/5$ des Zaunes. Tom benötigt hingegen 7 Stunden für den ganzen Zaun, er kann also $1/7$ des Zaunes in einer Stunde streichen.

$$\text{Rate}_{\text{Friederike}} = 1/5$$

$$\text{Rate}_{\text{Tom}} = 1/7$$

Schritt 2: Wenn man die Arbeitsraten für die beiden Personen bestimmt hat, berechnet man in einem zweiten Schritt die Arbeitsleistung, die Friederike und Tom gemeinsam in h Stunden erbringen. Dazu benötigt man folgende Gleichung:

$$\text{Rate}_1 * \text{Zeit } h + \text{Rate}_2 * \text{Zeit } h = 1 = \text{Arbeitsleistung}$$

Setzt man die Werte der Beispielaufgabe (Raten und zu erbringende Arbeitsleistung) in diese Gleichung ein, ergibt sich folgendes:

$$1/5 * h + 1/7 * h = 1$$

$$\Leftrightarrow (1/5 + 1/7) * h = 1$$

$$\Leftrightarrow (7/35 + 5/35) * h = 1$$

$$\Leftrightarrow 12/35 * h = 1$$

Die Gleichung besagt, dass Friederike und Tom zusammen in einer Stunde $12/35$ des Zaunes streichen können und dass sie h Stunden benötigen, um den gesamten Zaun zu streichen.

Schritt 3: Löst man die Gleichung nach h auf, erhält man die Zeit, die beide Personen gemeinsam benötigen würden, um die Arbeit zu erledigen.

$$h = 35/12$$

Wenn Tom und Friederike zusammen arbeiten, benötigen sie $35/12$ Stunden oder 2 Stunden und 55 Minuten, um den ganzen Zaun zu streichen.

Als Testaufgaben wurden in allen Untersuchungen insgesamt 12 Aufgaben verwendet, von denen neun Aufgaben isomorph zu den Lernbeispielen waren. Bei den drei übrigen Aufgaben war dagegen jeweils eine Adaption von einem der bekannten Lösungswege notwendig (Transferaufgaben).

Die Konstruktion der neun isomorphen Aufgaben orientierte sich an einer Matrix, bei der die Zeilen die Aufgabenkategorie und die Spalten die semantische Einbettung festlegen (vgl. Tabelle 15). Damit können alle Aufgaben innerhalb einer Zeile unter Anwendung des gleichen Lösungswegs gelöst werden. Jeweils eine der Aufgaben in einer Zeile weist den üblicherweise mit der entsprechenden Aufgabenkategorie assoziierten semantischen Kontext auf (in der Tabelle grau unterlegt). Diese Aufgaben werden im Folgenden als *korrespondierende Aufgaben* bezeichnet. Die semantische Einbettung der übrigen beiden Aufgaben entspricht dagegen so weit wie möglich den typischen Oberflächenmerkmalen der beiden anderen Aufgabenkategorien (*nicht-korrespondierende Aufgaben*). Jede Spalte enthält damit semantisch ähnliche Aufgaben, die jedoch jeweils die Anwendung einer anderen Lösungsprozedur erforderlich machen. Dieses Vorgehen bei der Konstruktion der Testaufgaben erlaubt eine unabhängige Manipulation der Oberflächen- und Strukturmerkmale von Textaufgaben und wird im Folgenden auch als Kreuzvariation bezeichnet.

In zwei Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Verwendung typischer bzw. nicht-typischer semantischer Einbettungen bei der Gestaltung von zu bearbeitenden Textaufgaben das Problemlöseverhalten und die resultierende Performanz sehr stark beeinflusst. In den Experimenten von Hinsley et al. (1977) zeigte sich, dass die Versuchspersonen schon nach dem Lesen der ersten Wörter einer Aufgabenstellung angeben konnten, zu welcher Aufgabenkategorie die Aufgabe gehört, wenn die Aufgabe in dem typischerweise mit der entsprechenden Kategorie assoziierten Kontext eingebettet war. Auf dieser Arbeit aufbauend, zeigten Blessing und Ross (1996), dass die Performanz für Algebraaufgaben mit einer semantischen Einbettung, die typischerweise mit einer anderen Aufgabenkategorie assoziiert ist, schlechter war als für solche Aufgaben, die einen neutralen oder den typischen Kontext aufwiesen.

Die Befunde von Hinsley et al. (1977) sowie von Blessing und Ross (1996) können sowohl auf der Basis schemabasierter Ansätze zum Problemlösen als auch auf der Basis von Modellen zum analogen Problemlösen erklärt werden. Im Rahmen schemabasierter Ansätze zum Problemlösen wird davon ausgegangen, dass auch Aufga-

benschemata nicht ausschließlich in einer abstrakten Repräsentation der Strukturmerkmale bestehen müssen. Da Aufgabenschemata die Gemeinsamkeiten der Aufgaben repräsentieren, über die eine Schemainduktion erfolgt, können sie vielmehr auch Oberflächenmerkmale enthalten, wenn diese typisch für die betrachteten Aufgaben sind und daher von einer Vielzahl von Aufgaben der Aufgabenkategorie geteilt werden. Diese Tatsache kann sich bei der Bearbeitung einer neuen Aufgabe als leistungsförderlich erweisen, wenn diese Aufgabe in den semantischen Kontext eingebettet ist, in dem Aufgaben der jeweiligen Aufgabenkategorie üblicherweise vorkommen (Blessing & Ross, 1996; Faries & Reiser, 1988; Hesse & Hahn, 1994; Hinsley et al., 1977; Mayer, 1981; Ross & Bradshaw, 1994). In diesem Fall können die Oberflächenmerkmale der zu bearbeitenden Aufgabe einen hilfreichen Abrufreiz bilden, über den das korrekte Aufgabenschema aktiviert werden kann. Sind die Oberflächenmerkmale der Aufgabe jedoch untypisch für diese Aufgabenkategorie oder werden sogar typischerweise für eine andere Aufgabenkategorie verwendet, kann es zu Leistungseinbußen kommen, da ihre Oberflächenmerkmale ein ungeeignetes Aufgabenschema aktivieren, nämlich das Schema, welches zur Bearbeitung der Aufgaben einer anderen Aufgabenkategorie geeignet ist. Diese Befunde sind nicht nur mit Annahmen zum schemabasierten Problemlösen kompatibel, wie sie in Abschnitt 2.2 skizziert wurden, sondern auch mit den dort beschriebenen Modellen analogen Problemlösens.

Für analoges Problemlösen kann davon ausgegangen werden, dass Zielprobleme, die eine atypische semantische Einbettung aufweisen, zur Aktivierung ungeeigneter Quellprobleme im Gedächtnis führen können, wenn Ähnlichkeiten hinsichtlich der Oberflächenmerkmale den Abrufprozess gegenüber strukturellen Ähnlichkeiten dominieren. Für Zielprobleme mit atypischer semantischer Einbettung ist damit die Wahrscheinlichkeit, ein ungeeignetes Quellproblem aus dem Gedächtnis abzurufen deutlich größer, als für Zielprobleme, die eine für ihre Aufgabenkategorie typische oder zumindest doch neutrale Einbettung aufweisen.

Tabelle 15: Konstruktionsmatrix für die neun isomorphen in den Experimenten 1 bis 3 verwendeten Testaufgaben

Aufgaben- kategorie	Semantische Einbettung der Testaufgaben		
	<i>Arbeit (OM₁)</i>	<i>Autofahren (OM₂)</i>	<i>Aktien (OM₃)</i>
<i>Arbeits- aufgaben (SM₁)</i>	SM ₁ OM ₁ : Ein Elektriker repariert eine Lampe in 3 Stunden, während sein Gehilfe für diesen Job die doppelte Zeit einkalkulieren muss. Wie lange benötigen die beiden für die Reparatur der Lampe, wenn sie zusammen arbeiten?	SM ₁ OM ₂ : Gerda benötigt 6 Stunden, um zu Hans zu gelangen, während Hans für die umgekehrte Strecke zwei Stunden weniger benötigt. Wie lange müssen die beiden fahren, bis sie sich auf dieser Strecke treffen, wenn sie beide zur gleichen Zeit losfahren?	SM ₁ OM ₃ : Bei zwei Aktienfonds kauft man jeden Monat zu einem festgesetzten Preis einen Anteilschein für eine Aktie. Bei dem ersten Fond erhält man jedes Jahr 12% einer Mercedes-Aktie, während man bei einer Investition in den zweiten Fond jährlich 18% einer Mercedes-Aktie bekommt. Wie lange muss man einzahlen, um 1 Mercedes-Aktie zu erhalten, wenn man in beide Aktienfonds gleichzeitig investiert?
<i>Distanz- aufgaben (SM₂)</i>	SM ₂ OM ₁ : Christian fertigt in einem bestimmten Zeitraum 612 Autoteile an, während Julius im gleichen Zeitraum 756 Teile herstellt. Christian hat 34 Teile am Tag produziert. Wie viele Teile hat Julius täglich hergestellt?	SM ₂ OM ₂ : Thomas und Janine fahren zur gleichen Zeit los, um nach Frankfurt zu gelangen. Thomas ist 135 km von Frankfurt entfernt und Janine 200 km. Beide kommen zur gleichen Zeit in Frankfurt an. Thomas ist mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 54 km/h gefahren. Wie schnell ist Janine gefahren?	SM ₂ OM ₃ : Jan und Dieter investieren in unterschiedliche Aktienfonds. Jan macht mit seinem Fond 552 DM Gewinn, während Dieter im gleichen Zeitraum 644 DM einstreicht. Jan hat jeden Tag 12 DM Gewinn gemacht. Welche Summe hat Dieter täglich gewonnen?

Tabelle 15: Konstruktionsmatrix für die neun isomorphen in den Experimenten 1 bis 3 verwendeten Testaufgaben (Fortsetzung)

Aufgaben- kategorie	Semantische Einbettung der Testaufgaben		
	<i>Arbeit (OM₁)</i>	<i>Autofahren (OM₂)</i>	<i>Aktien (OM₃)</i>
<i>Zins- aufgaben (SM₃)</i>	SM ₃ OM ₁ : Bauer Alfred hat in zwei Jahren einen Ertrag erwirtschaftet, der 20% seines Saatguts ausmacht, während Bauer Hermann im gleichen Zeitraum einen Ertrag erzielt hat, der 12% seines Saatguts beträgt. Beide Bauern haben zusammen 3000 kg Saatgut bekommen und haben 520 kg Getreide produziert. Wie viel Saatgut hat Bauer Alfred erhalten?	SM ₃ OM ₂ : Thorsten und Susanne fahren beide um 9 Uhr von zu Hause los, um sich in einer Stadt zu treffen, die irgendwo auf der 950 km langen Strecke zwischen ihren Wohnorten liegt. Nach ihrem Treffen telefonieren die beiden während der Rückfahrt noch einmal miteinander. Thorsten hat zu diesem Zeitpunkt 15% seiner Strecke zurückgelegt und Susanne 10% ihres Weges. Zusammen haben beide bereits 120 km ihres Rückweges hinter sich gebracht. Wie weit ist der Treffpunkt von Thorstens Wohnort entfernt?	SM ₃ OM ₃ : Herr Müller möchte eine Summe von 8000 DM in Aktien anlegen. Er entscheidet sich, den einen Teil seines Vermögens in den Debit-Aktienfond zu investieren, der eine jährliche Rendite von 6,5% aufweist. Mit dem Rest kauft er verschiedene Aktien, die zusammen 8% Gewinn erbringen. Am Ende des Jahres hat Herr Müller 557,50 DM Gewinn gemacht. Welche Summe hat er bei Debit investiert?

Anmerkung: SM steht für die eine Aufgabenkategorie repräsentierenden Strukturmerkmale, OM für die Oberflächenmerkmale der semantischen Einbettung. Entspricht der SM-Index dem OM-Index, handelt es sich um eine korrespondierende Aufgabe, die in dem für sie typischen semantischen Kontext eingebettet ist (grau unterlegt). Weichen die Indices dagegen voneinander ab, bedeutet dies, dass eine Aufgabe einer bestimmten Aufgabenkategorie in einem für diese Aufgabekategorie untypischen, aber für Aufgaben einer anderen Aufgabenkategorie typischen Kontext dargeboten wird (nicht-korrespondierende Aufgabe).

In einer Serie von drei Experimenten wurde einer Reihe spezifischer Hypothesen nachgegangen, die Aussagen darüber machen, wie sich die Verwendung korrespondierender bzw. nicht-korrespondierender Aufgaben auf die Entstehung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten auswirkt. Um der Tatsache gerecht zu werden, dass diese Hypothesen sowohl mit schemabasierten als auch mit analogen Ansätzen zum Problemlösen vereinbar sind, indem sie entweder auf der Nutzung von Aufgabenschemata oder auf der Nutzung von Quellproblemen beruhen, wird im Folgenden auf diese beiden Wissensarten allgemein als „Wissensrepräsentationen“ Bezug genommen. Zur besseren Verständlichkeit dieser Hypothesen werden jedoch zunächst die beiden in den Experimenten eingesetzten Präsentationssequenzen für die neun isomorphen Testaufgaben (Tabelle 16) beschrieben, bevor im Anschluss die Untersuchungshypothesen dargestellt werden.

In einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz (*SM-Sequenz*) waren die Aufgaben gemäß ihrer Zugehörigkeit zu einer der drei Aufgabenkategorien angeordnet, so dass erst alle drei Aufgaben einer Aufgabenkategorie, dann die drei Aufgaben der nächsten Aufgabenkategorie und schließlich die Aufgaben der dritten Aufgabenkategorie dargeboten wurden. Innerhalb jedes dieser drei Aufgabenblöcke waren die Aufgaben unter Anwendung derselben Gleichung lösbar, unterschieden sich jedoch hinsichtlich ihrer semantischen Einbettung. Die erste Aufgabe jedes Blocks hatte immer die gleiche semantische Einbettung wie das Lernbeispiel und damit die für diese Aufgabenkategorie typische semantische Einbettung (Korrespondenz zwischen semantischer Einbettung und Aufgabenkategorie), während die übrigen beiden Aufgaben einen semantischen Kontext aufwiesen, der jeweils für eine der anderen beiden Aufgabenkategorien typisch war (nicht-korrespondierende Aufgaben). Es wurden drei verschiedene SM-Sequenzen realisiert, um eventuelle Positionseffekte sowie Sequenzeffekte, die möglicherweise aus der Abfolge der Aufgabenkategorien resultieren, kontrollieren zu können⁴. Die Daten wurden über die drei SM-Sequenzen hinweg aggregiert.

⁴ Nach dem in Abschnitt 3.3 skizzierten Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten sind allerdings keine Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Abfolge der Aufgabenkategorien (wohl aber in Abhängigkeit von der Abfolge einzelner Aufgaben, siehe unten) zu erwarten, da diese strukturelle Ähnlichkeiten der Aufgabenkategorien untereinander voraussetzen würden.

Tabelle 16: Nach Strukturmerkmalen (SM) bzw. nach Oberflächenmerkmalen (OM) gebildete Aufgabenblöcke sowie aus den Aufgabenblöcken konstruierte Aufgabensequenzen für die neun isomorphen Testaufgaben

	Aufgabenblöcke	Aufgabensequenzen
SM-Sequenzen	<i>Block 1:</i> SM1 _{OM1} SM1 _{OM2} SM1 _{OM3}	<i>Block 1 – Block 2 – Block 3</i>
	<i>Block 2:</i> SM2 _{OM2} SM2 _{OM1} SM2 _{OM3}	<i>Block 3 – Block 1 – Block 2</i>
	<i>Block 3:</i> SM3 _{OM3} SM3 _{OM1} SM3 _{OM2}	<i>Block 2 – Block 3 – Block 1</i>
OM-Sequenzen	<i>Block 1:</i> SM1 _{OM1} SM2 _{OM1} SM3 _{OM1}	<i>Block 1 – Block 2 – Block 3</i>
	<i>Block 2:</i> SM2 _{OM2} SM1 _{OM2} SM3 _{OM2}	<i>Block 3 – Block 1 – Block 2</i>
	<i>Block 3:</i> SM3 _{OM3} SM1 _{OM3} SM2 _{OM3}	<i>Block 2 – Block 3 – Block 1</i>

In einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz (*OM-Sequenz*) waren die Aufgaben so angeordnet, dass jeweils drei semantisch ähnliche Aufgaben aufeinander folgten, die jedoch alle mit unterschiedlichen Gleichungen zu bearbeiten waren, da sie verschiedenen Aufgabenkategorien angehörten. Die erste Aufgabe jedes Aufgabenblocks war jeweils mit dem Lösungsprinzip lösbar, mit dem auch das bezüglich der Oberflächenmerkmale ähnliche Lernbeispiel lösbar war, d.h. für diese erste Aufgabe bestand jeweils eine Korrespondenz zwischen der semantischen Einbettung und der Aufgabenkategorie. Die übrigen beiden Aufgaben eines Blocks wiesen ähnliche Oberflächenmerkmale wie die erste Aufgabe auf, mussten jedoch durch Anwendung der Lösungsprinzipien der anderen Aufgabenkategorien bearbeitet werden (nicht-korrespondierende Aufgaben). Auch hier wurden drei verschiedene OM-Sequenzen realisiert, um eventuelle Positionseffekte sowie Sequenzeffekte, die sich aus der Anordnung der Oberflächenmerkmale ergeben, kontrollieren zu können.

In einem ersten Experiment wurde der Frage nachgegangen, welche Sequenzeffekte sich für die Problemlöseperformanz ergeben, wenn die Testaufgaben entweder in der OM-Sequenz oder aber in der SM-Sequenz bearbeitet werden müssen.

6.1 Experiment 1: Sequenzeffekte bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben in vorgegebenen Reihenfolgen

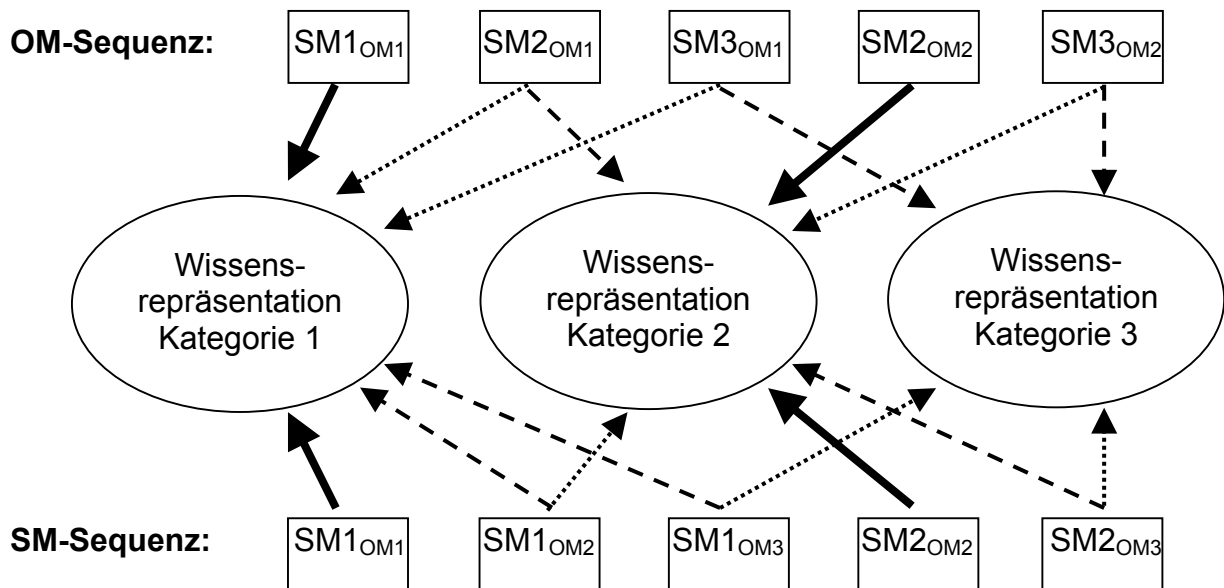
Für den Vergleich der Problemlöseperformanz, die sich aus der Bearbeitung der Testaufgaben in den beiden Sequenzen ergibt, können zwei bereits in Abschnitt 3.3 eingeführte Hypothesen formuliert werden, die im Folgenden als Transfer-Hypothese (Untersuchungshypothese 4) und als *near-miss* Hypothese (Untersuchungshypothese 5) bezeichnet werden. Beide Vorhersagen sind aus der in Abschnitt 3.2 vorgenommenen Bedingungsanalyse zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung abgeleitet und spiegeln die dort herausgearbeitete mehrdeutige Rolle von Oberflächenmerkmalen vor allem im Rahmen analogen Problemlösens wider. Sie unterscheiden sich bezüglich drei wesentlicher Merkmale: (1) Die beiden Hypothesen machen widersprüchliche Vorhersagen bezüglich der Rolle kreuzvariierender Oberflächen- und Strukturmerkmale im Hinblick auf die Bewusstheit von Problemlöseprozessen (automatischer Einsatz voraktivierter Wissensrepräsentationen vs. deliberative Verarbeitung von Aufgabenmerkmalen). (2) Sie unterscheiden sich weiterhin bezüglich ihrer Annahmen darüber, welche Konsequenzen sich aus kreuzvariierenden Oberflächen- und Strukturmerkmalen für die Problemlöseperformanz ergeben (beeinträchtigend versus förderlich) und entscheiden damit über die Richtung von Sequenzeffekten für die beiden beschriebenen Aufgabenabfolgen. (3) Die Transfer-Hypothese und die *near-miss* Hypothese differieren schließlich darin, ob sie Sequenzeffekte überwiegend auf die unterschiedliche Eignung der untersuchten Aufgabensequenzen für Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung oder aber für Transferprozesse zurückführen. Die beiden Hypothesen werden im Folgenden im Hinblick auf diese drei Merkmale (Bewusstheit von Problemlöseprozessen, Problemlöseperformanz und Erklärung von Sequenzeffekten) vorgestellt.

Transfer-Hypothese: In der Transfer-Hypothese wird davon ausgegangen, dass Oberflächenähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben verschiedener Aufgabenkategorien die Problemlöseperformanz beeinträchtigen können, indem voraktivierte Wissensrepräsentationen (d.h. Aufgabenschemata bzw. Quellprobleme) automatisch zur Lösung nachfolgender Aufgaben angewendet werden (negativer Transfer). Umgekehrt sollte die Anordnung der Aufgaben nach ihren Strukturmerkmalen (ungeachtet der Ausprägungen der Oberflächenmerkmale) einen positiven

Transfer zwischen diesen Aufgaben ermöglichen. Aus der Perspektive des integrativen Rahmenmodells zur Erklärung von Sequenzeffekten sollte daher eine Bearbeitung der Aufgaben in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz zu besseren Problemlöseleistungen führen als in einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Aufgabensequenz und zwar als Folge einer besseren Eignung der SM-Sequenz für Transferprozesse als eine wesentliche Komponente des besagten Modells.

Die Transfer-Hypothese beruht sehr stark auf einem Aktivations-Summations-Modell, wie es unter anderem im Rahmen der kognitiven Architektur ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) oder aber auch von Holyoak und Mitarbeitern (Holyoak, 1985; Holyoak & Koh, 1987) im Zusammenhang mit dem *retrieval*-Prozess beim analogen Problemlösen postuliert wird. Nach diesem Modell können sowohl Übereinstimmungen hinsichtlich der strukturellen als auch der oberflächlichen Merkmale einer Aufgabe zu einer Aktivierung einer Wissensrepräsentation (vgl. Blessing & Ross, 1996; Hinsley et al., 1977) führen. Es wird angenommen, dass als Konsequenz die jeweils am höchsten aktivierte Wissensrepräsentation für die Aufgabenbearbeitung herangezogen wird (Abbildung 5).

Darüber hinaus wird zur Erklärung der Entstehung von Sequenzeffekten davon ausgegangen, dass Wissensrepräsentationen, die bereits zur Bearbeitung einer Aufgabe eingesetzt wurden, aus diesem Grund eine Voraktivierung aufweisen, die sich – auf Grund der Trägheit des kognitiven Systems (vgl. *task-set inertia* nach Allport et al., 1994 zur Erklärung von Wechselkosten im Rahmen des Taskshift-Paradigmas in Abschnitt 1.1) – auf Prozesse zur Bearbeitung nachfolgender Aufgaben auswirkt. Insbesondere sollten diese voraktivierten Wissensrepräsentationen im Vergleich zu nicht-voraktivierten Wissensseinheiten unter ansonsten vergleichbaren Bedingungen eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, auch zur Bearbeitung weiterer Aufgaben eingesetzt zu werden. Bei diesen voraktivierten Wissensrepräsentationen kann es sich sowohl um Quellprobleme als auch um Aufgabenschemata handeln. Es wird also ähnlich wie in der kognitiven Architektur ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) angenommen, dass die Verfügbarkeit bzw. Aktivierung einer Wissensseinheit einerseits von ihrer Basisaktivierung, die von der Häufigkeit und dem letzten Zeitpunkt ihrer Nutzung abhängt, und andererseits von der durch den Kontext (d.h. von den Merkmalen einer Aufgabe) zur Verfügung gestellten Zusatzaktivierung bestimmt wird (vgl. auch Abschnitt 3.1.1 dieser Arbeit).



Aktivierung durch Überlappung in Struktur- und Oberflächenmerkmalen: \longrightarrow

Aktivierung durch Überlappung in Strukturmerkmalen: $-\ - - \blacktriangleright$

Aktivierung durch Überlappung in Oberflächenmerkmalen: $\cdots\cdots\cdots\blacktriangleright$

Abbildung 5: Darstellung der Aktivierung von Wissensrepräsentationen nach der Transfer-Hypothese

Die auf diesen Grundannahmen beruhende Vorhersage zu Sequenzeffekten, die im Folgenden erläutert werden soll, besagt, dass die Performanz in einer OM-Sequenz schlechter ausfallen sollte als in einer SM-Sequenz.

- *Performanz in einer OM-Sequenz:* Durch die erste Aufgabe der OM-Sequenz, bei der die semantische Einbettung mit der Aufgabenkategorie korrespondiert, wird die für diese Aufgabe korrekte Wissensrepräsentation sowohl durch Übereinstimmungen hinsichtlich der Struktur- als auch der Oberflächenmerkmale aktiviert und auf die Aufgabe angewendet. Für die nachfolgenden Aufgaben des ersten Blocks erweist sich diese Wissensrepräsentation als ungeeignet, weil diese anderen Aufgabenkategorien angehören. Da diese Aufgaben jedoch eine ähnliche semantische Einbettung wie die erste Aufgabe aufweisen und damit die gleiche Wissensrepräsentation aktivieren, ist es möglich, dass die bereits voraktivierte Wissensrepräsentation fälschlicherweise für die Bearbeitung der in Wirklichkeit strukturell unähnlichen Aufgaben beibehalten wird. Folglich kann es in einer OM-Sequenz zu einem negativen Transfer zwischen

Aufgaben innerhalb eines Aufgabenblocks kommen. Der diesem negativen Transfer zugrunde liegende Aktivierungsprozess verläuft nach Hinsley et al. (1977) sehr schnell, so dass bereits nach Feststellung nur weniger Ähnlichkeiten zwischen dem Kontext der aktuellen Aufgabe und einer Aufgabenkategorie, die mit diesem Kontext assoziiert wird, eine Aktivierung entsprechender Wissensrepräsentationen vorgenommen wird. Erst der Übergang zu einem nachfolgenden Aufgabenblock sollte einen Wechsel der zur Problemlösung herangezogenen Wissensrepräsentation initiieren. In diesem Fall aktivieren nämlich sowohl die Strukturmerkmale als auch die Oberflächenmerkmale dieser ersten Aufgabe eines Aufgabenblocks eine andere Wissensrepräsentation als jene, welche zur Bearbeitung der Aufgaben des vorherigen Blocks eingesetzt wurde. Bei dieser neu aktivierten Wissensrepräsentation sollte es sich um eine für die Bearbeitung dieser korrespondierenden Aufgabe geeignete Repräsentation handeln. Beeinträchtigungen der Problemlöseperformanz in einer OM-Sequenz sollten sich daher vor allem bei der Bearbeitung nicht-korrespondierender Aufgaben ergeben, nicht aber bei korrespondierenden Aufgaben, die jeweils einen neuen Aufgabenblock einleiten.

- *Performanz in einer SM-Sequenz:* Für eine SM-Sequenz kann ebenfalls angenommen werden, dass die Wissensrepräsentation, welche durch die Bearbeitung der jeweils ersten, korrespondierenden Aufgabe eines Blocks aktiviert wird, so dominant ist, dass sie sich im Fall konfligierender Wissensrepräsentationen, die möglicherweise durch die semantische Einbettung nachfolgender Aufgaben eines Blocks aktiviert werden, durchsetzt. Diese Dominanz ergibt sich unter anderem dadurch, dass die in diesem Fall für alle drei Aufgaben eines Blocks korrekte Wissensrepräsentation zusätzliche Aktivierung durch Übereinstimmungen hinsichtlich struktureller Merkmale bei der Bearbeitung der zweiten bzw. dritten Aufgabe eines Blocks erhält. Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgaben eines Blocks kann es im Fall einer SM-Sequenz zu einer leistungsförderlichen Wissensübertragung zwischen Aufgaben kommen (positiver Transfer). Auch in einer SM-Sequenz sollte der Übergang zu einem nachfolgenden Aufgabenblock einen Wechsel der für die Problemlösung verwendeten Wissensrepräsentation initiieren, da es sich bei der ersten Aufgabe des Aufgabenblocks um eine korrespondierende Aufgabe

handelt, bei der sowohl die Struktur- als auch Oberflächenmerkmale in einer Aktivierung der korrekten Repräsentation resultieren.

Aus diesen Annahmen ergibt sich erstens, dass eine SM-Sequenz zu besseren Bearbeitungsleistungen führen sollte als eine OM-Sequenz, bei welcher ein negativer Transfer zwischen Aufgaben eines Aufgabenblocks wahrscheinlich ist. Zweitens sollten sich keine Leistungsunterschiede für die jeweils ersten Aufgaben eines Aufgabenblocks finden lassen, d.h. für die Aufgaben, bei denen die Oberflächenmerkmale mit den für ihre Aufgabenkategorie typischen Oberflächenmerkmalen korrespondieren, da für diese Aufgaben in beiden Sequenzen ein Wechsel zu der jeweils korrekten Wissensrepräsentation vorhergesagt wurde. Sequenzeffekte sollten folglich allein in Leistungsunterschieden für nicht-korrespondierende Aufgaben zum Ausdruck kommen.

Near-miss Hypothese: Die *near-miss* Hypothese besagt dagegen, dass eine OM-Sequenz mit besseren Leistungen verbunden sein sollte als eine SM-Sequenz. Nach Oberflächenmerkmalen geblockte Aufgabensequenzen sollten nämlich in besonderer Weise geeignet sein, Unterschiede hinsichtlich struktureller Eigenschaften zwischen semantisch ähnlichen Testaufgaben hervorzuheben und damit eine bewusstere Aufgabenverarbeitung anzuregen. Folgen zwei semantisch ähnliche Aufgaben aufeinander, so werden Unterschiede, die zwischen den Aufgaben bestehen und die in diesem Fall in andersartigen Strukturmerkmalen bestehen, besonders salient. In einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz ist die zweite Aufgabe fast identisch mit der ersten und weicht nur in wenigen (strukturellen) Merkmalen von dieser ab. Sie stellt somit einen *near miss* dar (Gick & Paterson, 1992; Ross & Kilbane, 1997; Winston, 1975, 1980). Das Konzept des *near miss* haben sich beispielsweise Gick und Paterson (1992) in ihren Untersuchungen zur Förderung analogen Transfers zu nutze gemacht, indem sie versuchten, strukturelle Merkmale einer Aufgabenkategorie dadurch zu verdeutlichen, dass sie Gegenbeispiele darboten, die zwar den gleichen semantischen Kontext wie die Beispielinstanzen der eigentlich zu vermittelnden Aufgabenkategorie aufwiesen, aber einer anderen Aufgabenkategorie angehörten. Hier bestand die – teilweise empirisch bestätigte – Annahme, dass die Verwendung semantisch ähnlicher Gegenbeispiele eine deliberative Auseinandersetzung mit den Strukturmerkmalen der relevanten Aufgabenkategorie anregt und somit zum Wissenserwerb beiträgt.

Im Hinblick auf die Entstehung von Sequenzeffekten kann die Betonung struktureller Unterschiede aufeinander folgender Aufgaben in einer OM-Sequenz mehrere Konsequenzen nach sich ziehen: Sie ermöglicht zunächst die korrekte Repräsentation einer zu bearbeitenden Aufgabe und verhindert damit, dass ungeeignete Wissensrepräsentationen, die bei der vorangegangenen Aufgabe eingesetzt wurden, im Sinne eines *negativen* Transfers übertragen werden. Gleichzeitig regt die Betonung struktureller Abweichungen zur Vorgängeraufgabe vermutlich die Suche nach alternativen Vorgehensweisen zur Bearbeitung einer nachfolgenden Aufgabe an. Beispielsweise kann der postulierte Kontrasteffekt dazu beitragen, dass eine erneute Suche nach einem geeigneteren Quellproblem bzw. Aufgabenschema initiiert wird. Ein solcher Suchprozess setzt voraus, dass die Strukturmerkmale einer Aufgabe so weit elaboriert wurden und damit bekannt sind, dass ein Vergleich der Aufgabe mit Repräsentationen anderer Aufgaben und deren Lösungen oder mit Aufgabenschemata möglich ist.

In einer SM-Sequenz kann der *near-miss* Effekt dagegen darin bestehen, dass ausgerechnet Unterschiede in lösungsirrelevanten Oberflächenmerkmalen zwischen aufeinander folgenden strukturell ähnlichen Aufgaben betont werden. Diese Hervorhebung von lösungsirrelevanten Unterschieden kann möglicherweise dazu führen, dass unter diesen Umständen in der SM-Sequenz kein analoger Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben stattfindet, obwohl diese Sequenz dafür grundsätzlich geeignet wäre.

Aus der Perspektive des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten sind die nach der *near-miss* Hypothese zu erwartenden Vorteile einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Aufgabenabfolge vor allem auf die besondere Förderung von Lernprozessen bei der Aufgabebearbeitung zurückzuführen. Diese Lernprozesse bestehen in einer deliberativen Verarbeitung lösungsrelevanter Aufgabenmerkmale, die vom Problemlöser elaboriert werden müssen, um anstelle einer automatischen Wissensübertragung alternative Lösungswege heranziehen zu können. Auch unter der *near-miss* Erklärung sollten sequenzbedingte Leistungsunterschiede vor allem bei den Aufgaben zu beobachten sein, die in einem für sie untypischen Kontext eingebettet sind, während keine Unterschiede für die am Anfang eines jeweiligen Blocks stehenden Aufgaben vorhergesagt werden, bei denen die Strukturmerkmale und Oberflächenmerkmale korrespondieren. Die beiden widersprechenden Vorhersagen hinsichtlich der Sequenzeffekte für nicht-

korrespondierende Aufgaben (Transfer versus *near miss*) bilden den Gegenstand der nachfolgenden Untersuchung.

Des Weiteren sollte geprüft werden, ob die Verwendung unterschiedlicher Bearbeitungssequenzen einen Einfluss auf die Flexibilität des bei der Aufgabenbearbeitung erworbenen Wissens hat. Hierzu wurden im Anschluss an im Vergleich zu den Lernbeispielen isomorphen Testaufgaben, deren sequentielle Darbietung variiert wurde, drei zusätzliche Transferaufgaben in einer festen Bearbeitungssequenz präsentiert (Tabelle 17), bei denen jeweils eine Modifikation des Lösungsprinzips von einer der drei untersuchten Aufgabenkategorien erforderlich war.

Tabelle 17: Transferaufgaben

Ein Tischlermeister benötigt 3 Stunden, um eine Holztruhe zu reparieren, während sein Lehrling für die gleiche Aufgabe zwei Stunden länger braucht. Wie lange brauchen die beiden zur Fertigstellung der Truhe, wenn sie zusammenarbeiten und *der Lehrling bereits eine Stunde vorgearbeitet hat?*

Ein Zug verlässt die Station mit einer Geschwindigkeit von 72km/h Richtung Westen. Ein zweiter Zug startet *drei Stunden später* vom gleichen Ausgangspunkt mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 km/h auf einer Parallelstrecke in die gleiche Richtung. Wie lange benötigt der zweite Zug, um den ersten Zug zu überholen?

Helga hat am Anfang des Jahres *die Hälfte ihres Geldes* in einen Aktienfond mit 7% Verzinsung investiert, *ein weiteres Viertel* des Geldes erbringt 5 % Gewinn. Am Ende des Jahres hat sie insgesamt 95 DM Gewinn gemacht. Wie viel Geld stand Helga am Anfang des Jahres insgesamt zur Verfügung?

Anmerkung: Kursiv gekennzeichnet sind diejenigen Abschnitte der Aufgabenstellung, die eine Modifikation des in den Lernbeispielen dargestellten Lösungswegs nötig machen.

Bezüglich der Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben können in Abhängigkeit von den beiden vorgestellten Hypothesen ebenfalls zwei widersprechende Vorhersagen getroffen werden. Nach der Transfer-Hypothese sind keinerlei Performanzunterschiede für diese neuartigen Aufgaben in Abhängigkeit von der Reihenfolge, in der zuvor die isomorphen Aufgaben bearbeitet wurden, zu erwarten. Dagegen kann auf der Basis der *near-miss* Hypothese postuliert werden, dass die Performanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben besser sein sollte, wenn die Transferaufgaben im Anschluss an eine Bearbeitung der isomorphen Aufgaben in der OM-Sequenz im Vergleich zu einer SM-Sequenz gelöst werden. Im Rahmen dieser Hypothese wurde angenommen, dass die OM-Sequenz im Sinne eines Lernens

bei der Aufgabenbearbeitung (vgl. das integrative Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten, Abschnitt 3.3) den Erwerb von Wissen über Strukturmerkmale unterstützt und damit ein tiefer gehendes Verständnis der verschiedenen Aufgabenkategorien und der mit ihnen assoziierten Lösungsprozeduren ermöglicht. Insbesondere verdeutlichen OM-Sequenzen, wie sich Unterschiede hinsichtlich der Strukturmerkmale der Aufgaben in Unterschieden bezüglich der Lösungsprozeduren auswirken. Dieses Wissen bildet eine entscheidende Voraussetzung, um bekannte Lösungswege an neue Aufgaben zu adaptieren und damit um Transferaufgaben, die eben durch diese Notwendigkeit zur Modifikation von Lösungswegen gekennzeichnet sind, erfolgreich zu bearbeiten (Carbonell, 1986; Catrambone, 1998; Renkl, 1997). Gleichzeitig beinhaltet die OM-Sequenz eine erhöhte Variabilität, da ständig zwischen Aufgaben verschiedener Aufgabenkategorien gewechselt wird. Diese höhere Variabilität gegenüber der SM-Sequenz sollte sich im Sinne einer *variability of practice* (Fried & Holyoak, 1984; Paas & van Merriënboer, 1994; Ranzijn, 1991; Schmidt & Bjork, 1992) positiv auf die anschließende Bearbeitung der Transferaufgaben auswirken.

Method

Versuchspersonen. Bei den Versuchspersonen handelte es sich um 40 Studierende (33 weiblich, 7 männlich) verschiedener Fachbereiche der Georg-August-Universität Göttingen sowie der Universität des Saarlandes mit Deutsch als Muttersprache. Die Versuchspersonen waren zwischen 19 und 45 Jahre alt (Durchschnittsalter: 23,03 Jahre). Die Teilnahme an der Untersuchung erfolgte freiwillig. Die Versuchspersonen erhielten entweder ein bis zwei Versuchspersonenstunden (für Studierende der Psychologie) oder eine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme an dem Experiment.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. Sämtliche Versuchsmaterialien wurden in einer Papierversion eingesetzt. Zu Beginn der Untersuchung erhielt die Versuchsperson ein Formblatt, auf dem Alter, Geschlecht, Studienfach und -semester, die Mathematiknote im Abitur und die Art des Mathematikurses (Grundkurs versus Leistungskurs) eingetragen werden mussten. Im Anschluss folgte die Lernphase des Experiments, in der die Versuchsperson aufgefordert wurde, sich die drei in Tabelle 13 abgebildeten Lernbeispiele und deren ausgearbeitete Lösungen (vgl. Tabelle 14)

gründlich durchzulesen und diese möglichst gut nachzuvollziehen und zu verstehen. In der Instruktion wurde weiterhin darauf hingewiesen, dass für diese Lernphase insgesamt 12 Minuten zur Verfügung stünden. Schließlich wurde angekündigt, dass im Anschluss an die Lernphase 12 Probleme eigenständig zu bearbeiten seien, die den Lernbeispielen sehr ähnlich seien, und dass während der Problemlösephase kein Rückgriff auf die Informationen aus der Lernphase möglich sein werde.

In der Lernphase wurde jedes der drei Lernbeispiele zusammen mit der jeweiligen Beispiellösung und Erläuterungen zu den einzelnen Lösungsschritten und den verwendeten Formeln auf einem einzelnen Blatt dargeboten. Die Materialdarbietung entsprach der Darstellung in Tabelle 14. Nach Ablauf der 12 Minuten wurden die Lernbeispiele entfernt, und die Versuchsperson erhielt die Instruktion für die Problemlösephase. Darin wurde sie aufgefordert, 12 Aufgaben in einer vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge zu lösen. Hierfür sollten sowohl der Lösungsweg als auch das endgültige Ergebnis auf einem dafür vorgesehenen Lösungszettel notiert werden. Eine Modifikation bereits durchgeführter Bearbeitungen oder eine nachträgliche Bearbeitung übersprungener Aufgaben wurde nicht gestattet. Für die Problemlösephase bestanden keinerlei Zeitbeschränkungen, und die Versuchspersonen wurden aufgefordert, die Aufgaben möglichst gründlich und unter Vermeidung von Fehlern zu bearbeiten. Zur Messung des für die Lösung der Aufgaben erforderlichen Zeitbedarfs wurden sie zusätzlich angehalten, den Zeitpunkt des Beginns und des Endes einer jeweiligen Aufgabenbearbeitung auf dem Lösungszettel zu notieren.

In der Problemlösephase mussten zunächst neun Testaufgaben, die jeweils zu einem der drei Lernbeispiele isomorph waren, in einer fest vorgegebenen Reihenfolge bearbeitet werden, wobei die Abfolge der Aufgaben durch die jeweilige Experimentalbedingung definiert war. Die Aufgaben waren entsprechend der oben beschriebenen Kreuzvariation von Oberflächen- und Strukturmerkmalen so konstruiert, dass jeweils drei der Aufgaben die gleichen Strukturmerkmale, aber unterschiedliche Oberflächenmerkmale aufwiesen. Umgekehrt hatten jeweils drei der Textaufgaben eine identische semantische Einbettung, für ihre Lösung mussten jedoch unterschiedliche Lösungsprinzipien eingesetzt werden. Jede Aufgabe war auf einem einzelnen Blatt abgedruckt, auf dem auch ihre Lösung notiert werden sollte. Die Aufgabenblätter waren entsprechend der realisierten Präsentationssequenz zu einem Booklet zusammengeheftet.

Im Anschluss an die Bearbeitung der neun isomorphen Testaufgaben wurden den Versuchspersonen die drei Transferaufgaben vorgelegt, die von allen Versuchspersonen eigenständig in der in Tabelle 17 dargestellten Reihenfolge bearbeitet werden mussten.

Versuchsdesign. Als unabhängige Variable wurde die *Präsentations-* bzw. *Bearbeitungssequenz* der neun isomorphen Testaufgaben variiert. In den nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenzen (*SM-Sequenzen*) wurden die Aufgaben gemäß ihrer Zugehörigkeit zu einer der drei Aufgabenkategorien gruppiert, während die Testaufgaben in den *OM-Sequenzen* nach Oberflächenmerkmalen geblockt dargeboten wurden. Für jede Sequenzart (OM versus SM) resultierten aufgrund der Ausbalancierung der Abfolge der Aufgabenkategorien drei verschiedene Sequenzen (vgl. Tabelle 16), deren Daten jeweils gemittelt wurden. Basierend auf der interindividuellen Bedingungsvariation resultierte ein Zwei-Gruppen Design.

Abhängige Variablen. Als abhängige Variablen wurden die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Aufgaben* (insgesamt sowie getrennt für die Performanz bei der Bearbeitung korrespondierender bzw. nicht-korrespondierender Aufgaben), die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben* sowie die *Bearbeitungszeiten* für diese beiden Abschnitte der Problemlösephase in Minuten registriert. Die Bewertung der Aufgabenlösungen wurde nach folgendem Bewertungsschema vorgenommen: Eine Versuchsperson erhielt einen Punkt, wenn sie die Aufgabe fehlerfrei gelöst hatte. 0,75 Punkte wurden vergeben, wenn zwar die korrekte Gleichung aufgestellt wurde, bei den weiteren Berechnungen jedoch kleinere Rechenfehler oder Fehler bei der Umstellung der Gleichung zu einem falschen Endergebnis geführt hatten. Eine Aufgabenlösung wurde mit 0,5 Punkten bewertet, wenn die Gleichung weitestgehend korrekt aufgestellt wurde, die weiteren Berechnungen jedoch entweder fehlten oder vollständig falsch waren. 0,25 Punkte wurden für das Vorhandensein des unvollständigen Lösungsansatzes ohne weitere Berechnungen vergeben. Schließlich erhielt eine Versuchsperson keine Punkte für die Aufgabenbearbeitung, wenn entweder keine Angaben zur Lösung gemacht wurden oder ein richtiger Lösungsansatz nicht erkennbar war. Dieses Bewertungsschema wurde sowohl auf die isomorphen als auch auf die Transferaufgaben angewendet. Die aufsummierten Punktwerte wurden in Prozentwerte der erreichbaren Punktezahl für isomorphe bzw. für Transferaufgaben transformiert.

Ergebnisse

Überprüfung der Vergleichbarkeit der Eingangsvoraussetzungen. In einem ersten Schritt wurde überprüft, inwieweit die Versuchspersonen der beiden Experimentalbedingungen vergleichbare mathematische Vorkenntnisse aufwiesen. Dabei wurde zunächst die von einer Versuchsperson angegebene Mathenote mit der Art des in der Oberstufe besuchten Mathematikurses gewichtet, um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der in Leistungskursen erbrachten Noten mit den in Grundkursen erhaltenen Noten zu erreichen. Mathematiknoten, die aus einem Leistungskurs resultierten, wurden halbiert, während Grundkursnoten unverändert in die Analysen übernommen wurden. Eine einfaktorielle ANOVA erbrachte keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Sequenzbedingungen hinsichtlich der mit der Kursart gewichteten Mathenote im Abitur (OM-Sequenz: $M = 2,38$; SM-Sequenz: $M = 2,52$; $F < 1$). Anschließend durchgeführte Korrelationsanalysen zwischen den erhobenen Performanzmaßen und der gewichteten Mathenote sowie weiteren soziodemografischen Variablen verwiesen jedoch auf hochsignifikante Zusammenhänge zwischen der Mathenote und den Performanzmaßen (z.B. gewichtete Mathenote – Gesamtperformanz: $r = -.41$; $p = .01$; $N = 40$) sowie dem Geschlecht der Versuchspersonen und Performanzmaßen (z.B. Geschlecht – Gesamtperformanz: $r = .57$; $p < .001$; $N = 40$), so dass diese beiden Variablen als Kovariaten in alle nachfolgenden Analysen eingeschlossen wurden. Interessanterweise fand sich kein Zusammenhang zwischen den beiden Kovariaten, d.h. weibliche Versuchspersonen wiesen keine schlechteren Mathematiknoten auf als männliche Versuchspersonen, zeigten jedoch schlechtere Leistungen bei der Bearbeitung der isomorphen und der Transferaufgaben.

Problemlöseperformanz. Eine kovarianzanalytische Analyse der *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben* erbrachte einen Sequenzefekt zu Gunsten der OM-Sequenz (Abbildung 6): Versuchspersonen, die die Aufgaben in einer OM-Sequenz bearbeitet hatten, erbrachten bessere Leistungen, als wenn die Präsentations- bzw. Bearbeitungssequenz nach Strukturmerkmalen geblockt gewesen war ($F(1,36) = 3,96$; $MSE = 304,70$; $p = .05$). Beide Kovariaten erwiesen sich als bedeutsam für den Problemlöseerfolg (Mathenote: ($F(1,36) = 5,72$; $MSE = 304,70$; $p < .05$; Geschlecht: ($F(1,36) = 19,24$; $MSE = 304,70$; $p < .001$).

In einem weiteren Analyseschritt wurde innerhalb der isomorphen Aufgaben zusätzlich zwischen Aufgaben unterschieden, deren semantischer Kontext typisch für die Aufgabenkategorie war, in die die Aufgabe fiel (korrespondierende Aufgaben), und Aufgaben, deren semantischer Kontext typisch für eine andere Aufgabenkategorie war (nicht-korrespondierende Aufgaben). Sequenzeffekte ergaben sich wie vorhergesagt nur bezüglich der *Performanz bei der Bearbeitung nicht-korrespondierender Aufgaben* (Präsentationssequenz: $F(1,36) = 4,32$; $MSE = 456,77$; $p < .05$; Kovariate Mathenote: $F(1,36) = 7,14$; $MSE = 456,77$; $p < .05$; Kovariate Geschlecht: $F(1,36) = 12,89$; $MSE = 456,77$; $p = .001$), während sich kein Sequenzeffekt für korrespondierende Aufgaben nachweisen ließ ($F < 1$; Kovariate Mathenote: $F < 1$; Kovariate Geschlecht: $F(1,36) = 20,10$; $MSE = 289,12$; $p < .001$).

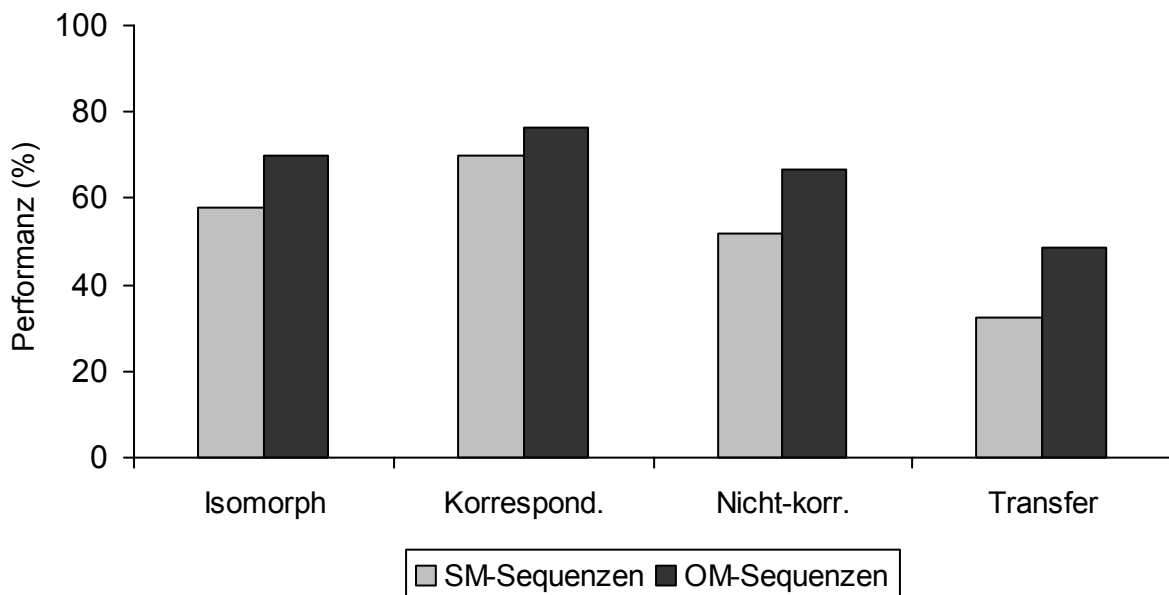


Abbildung 6: Problemlöseperformanz in % für verschiedene Aufgabentypen als Funktion der Bearbeitungssequenz

Eine Überlegenheit der OM-Sequenzen gegenüber den SM-Sequenzen zeigte sich ebenfalls bezüglich der *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben*. Diese Aufgaben wurden korrekter bearbeitet, wenn Versuchspersonen zuvor die isomorphen Testaufgaben in einer hinsichtlich der Abfolge der Strukturmerkmale hoch variablen OM-Sequenz bearbeitet hatten ($F(1,36) = 4,47$; $MSE = 575,08$; $p < .05$). Für diese abhängige Variable erwiesen sich erneut beide Kovariaten als hoch bedeutsam (Mathenote: $F(1,36) = 13,63$; $MSE = 575,08$; $p < .001$; Geschlecht: $F(1,36) = 14,31$; $MSE = 575,08$; $p < .001$).

Bearbeitungsdauer. Die Ergebnisse für die Bearbeitungsdauern (Abbildung 7) beruhen lediglich auf einer Teilstichprobe von 30 der 40 Versuchspersonen, da zehn Versuchspersonen während der Aufgabenbearbeitung vergessen hatten, den Beginn und das Ende der Bearbeitung einzelner Aufgaben anzugeben, so dass deren Daten nicht für die Auswertung zur Verfügung standen.

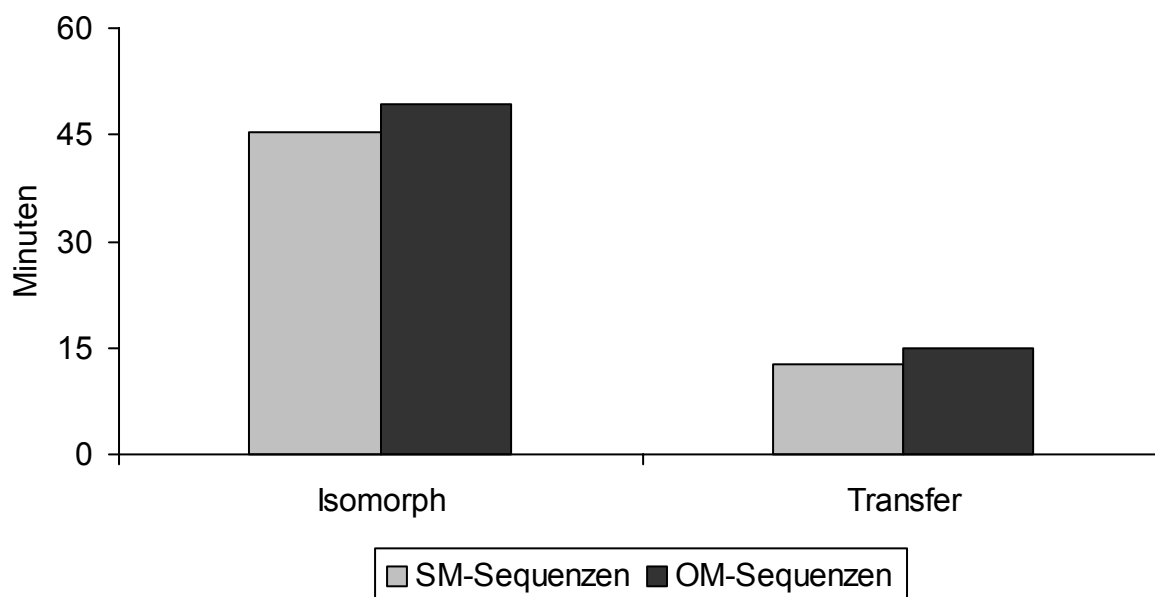


Abbildung 7: Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Bearbeitungssequenz

Hinsichtlich der Zeit, die für die Bearbeitung der Aufgaben benötigt wurde, ergab sich weder für die *Bearbeitungsdauer für isomorphe Testaufgaben* noch für die *Bearbeitungsdauer für Transferaufgaben* ein Sequenzeffekt (isomorphe Aufgaben: $F < 1$; Transferaufgaben: ($F(1,26) = 1,30$; $MSE = 70642,02$; $p > .25$). Bezüglich der Kovariaten hatte lediglich die Geschlechtsvariable einen Einfluss auf die Bearbeitungsdauer für isomorphe Testaufgaben ($F(1,26) = 4,97$; $MSE = 705097,02$; $p < .05$). In allen anderen Fällen erwiesen sich die Kovariaten als statistisch bedeutungslos (alle $F < 1$).

Zusammenfassung und Diskussion

Hinsichtlich der Problemlöseperformanz konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bearbeitungssequenzen nachgewiesen werden, der für die *near-miss* Hypothese spricht (Untersuchungshypothese 5). Das heißt, eine Bearbeitungsse-

quenz, bei der Aufgaben mit variierenden Strukturmerkmalen nach Oberflächenähnlichkeiten geblockt dargeboten werden, fördert scheinbar das Erkennen struktureller Unterschiede zwischen diesen Aufgaben und resultiert daher in einer besseren Problemlöseperformanz im Vergleich zu einer Bearbeitung der Aufgaben in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz. Erwartungsgemäß war dieser Leistungsvorteil vor allem für nicht-korrespondierende Aufgaben nachweisbar, d.h. für solche Aufgaben, die in einen semantischen Kontext eingebettet waren, der für Aufgaben eines anderen Aufgabentyps charakterisierend war. Gerade die Bearbeitung dieser nicht-korrespondierenden Aufgaben profitiert somit von einer Hervorhebung der lösungsrelevanten Strukturmerkmale, wie sie durch eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenz erreicht werden kann.

Nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenzen scheinen dabei wie angenommen vor allem die im integrativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten spezifizierten Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung zu unterstützen, indem sie ein tiefer gehendes Verständnis für die Strukturmerkmale der verschiedenen Aufgaben sowie für deren Zusammenhang mit den zu verwendenden Lösungsprozeduren fördern. Diese spezifische Förderung von Lernprozessen spiegelt sich vor allem auch in besseren Problemlöseleistungen bei der nachfolgenden Bearbeitung von Transferaufgaben wider, die eine Modifikation bekannter Lösungswege verlangen. Gleichzeitig beinhaltet eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz eine lernförderliche Übungsvariabilität, indem zwischen verschiedenen Aufgabenkategorien gewechselt werden muss (Fried & Holyoak, 1984; Paas & van Merriënboer, 1994; Ranzijn, 1991; Schmidt & Bjork, 1992). Damit haben sich in Experiment 1 deutliche Hinweise auf die Existenz von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben mit kreuzvariierenden Oberflächen- und Strukturmerkmalen finden lassen, die für die *near-miss* Hypothese sprechen.

Von besonderer Bedeutung ist dieser Befund vor allem auch für die im Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben enthaltene Annahme, dass Sequenzeffekte bei diesen Aufgaben nicht als Folge eines automatisch einsetzenden Transfers zwischen aufeinander folgenden strukturell ähnlichen Aufgaben auftreten, sondern dass ihr Auftreten Wissen über bestehende strukturelle Ähnlichkeiten voraussetzt. Hätte man *keinen* Sequenzeffekt für die beiden untersuchten Aufgabensequenzen nachweisen können, hätte dies unter anderem darin begründet sein können, dass eine OM-Sequenz zwar eher Lern-

prozesse bei der Aufgabenbearbeitung fördert, dass dafür aber eine SM-Sequenz Transferprozesse zwischen aufeinander folgenden Aufgaben unterstützt, so dass sich beide Effekte gegeneinander aufheben. Der Sequenzeffekt zu Gunsten der OM-Sequenz spricht jedoch dagegen, dass Problemlöser automatisch von Transfermöglichkeiten in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz profitieren, und liefert stattdessen Evidenz für die Annahme, dass ein Transfer zwischen voraussetzungsreichen Aufgaben Maßnahmen zur Förderung struktureller Ähnlichkeiten (Untersuchungshypothese 3) bzw. Wissen bezüglich derselben voraussetzt (Untersuchungshypothese 6).

Aufbauend auf den Ergebnissen von Experiment 1 wurde in Experiment 2 der weitergehenden Frage nachgegangen, inwieweit Versuchspersonen diese bei fest vorgegebener Aufgabenabfolge bestehenden Sequenzeffekte strategisch nutzen, wenn ihnen die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung freigestellt wird, d.h. wenn die Möglichkeit zur eigenständigen Sequenzierung der Aufgaben besteht.

6.2 Experiment 2: Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben in frei wählbaren Reihenfolgen

In Kapitel 4 wurde dafür argumentiert, dass Aufgabensequenzierung, also die Festlegung einer Bearbeitungsreihenfolge für eine Menge von Aufgaben durch den Problemlöser mit dem Ziel der Optimierung der Problemlöseperformanz, als invertierter Abrufprozess analoger Probleme verstanden werden kann. Für den *retrieval*-Prozess im Rahmen klassischer Modelle analogen Transfers gibt es eine Vielzahl von Befunden, die darauf hinweisen, dass dieser Prozess durch Oberflächenähnlichkeiten zwischen Aufgaben beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 3.2). Insbesondere konnte gezeigt werden, dass Problemlöser häufig solche Quellprobleme auswählen, die lediglich Ähnlichkeiten hinsichtlich lösungsirrelevanter Oberflächenmerkmale zum Zielproblem aufweisen (Hesse, 1991a, b; Hesse & Klecha, 1990; Holyoak & Koh, 1987; Keane, 1987; Reed et al., 1990; Ross, 1984, 1987, 1989; Ross & Kennedy, 1990). Geht man davon aus, dass es sich bei der Aufgabensequenzierung um einen inversen *retrieval*-Prozess handelt, sollten sich Oberflächenähnlichkeiten zwischen anzuordnenden Aufgaben daher derart auswirken, dass Bearbeitungsreihenfolgen hergestellt werden, die stärker durch Oberflächenähnlichkeiten als durch Übereinstimmungen hin-

sichtlich struktureller Merkmale der Aufgaben determiniert sind. Für die Ableitung von Vorhersagen im Hinblick auf die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung sowie auf die mit einer Sequenzierung verbundenen Performanzveränderungen muss berücksichtigt werden, auf der Basis welchen Wissens eine Aufgabensequenzierung vorgenommen wird (vgl. Abschnitt 4.2).

In Experiment 1 konnte gezeigt werden, dass eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Aufgabensequenz im Vergleich zu einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz mit besseren Leistungen verbunden ist, wenn die Reihenfolge der Aufgabenbearbeitung festgelegt ist. Dieser Befund wurde damit erklärt, dass eine OM-Sequenz in besonderer Weise den Erwerb von Wissen über strukturelle Unterschiede zwischen einzelnen Aufgaben fördert.

Aufbauend auf dieser Erklärung sollte in Experiment 2 die Bereitschaft zur Festlegung einer eigenen Bearbeitungsreihenfolge – von der zunächst grundsätzlich ausgegangen wird (Untersuchungshypothese 8) – im Fall einer OM-Sequenz insgesamt geringer ausgeprägt sein als in einer SM-Sequenz (vgl. Untersuchungshypothese 11). Versuchspersonen, die sich an Oberflächenmerkmalen orientieren, sehen in der nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz bereits eine „gute“ Sequenz, da hier ja oberflächlich ähnliche Aufgaben bereits aufeinander folgen, und sollten diese Aufgabenabfolge daher beibehalten. Versuchspersonen, die die strukturellen Unterschiede zwischen Aufgaben innerhalb eines Aufgabenblocks im Sinne der *near-miss* Erklärung bereits erkannt haben und damit über Wissen bezüglich der Strukturmerkmale verfügen, werden vermutlich nur selten die Notwendigkeit sehen, von dieser Bearbeitungsreihenfolge abzuweichen. Sollte jedoch eine Sequenzierung erfolgen, wird in diesem Fall ein Leistungsvorteil für Sequenzierer gegenüber den Beibehaltern erwartet, da eine Sequenzierung der Aufgaben – wenn sie erfolgt – vermutlich auf dem Erkennen struktureller Unterschiede zwischen aufeinander folgenden und oberflächlich ähnlichen Aufgaben aufsetzt (Untersuchungshypothese 12). Das heißt, dass diese Versuchspersonen über das notwendige Wissen bezüglich struktureller Aufgabenmerkmale verfügen, um bestehende Transferbeziehungen zu nutzen. Diese Vorhersage wirkt insofern zunächst kontraintuitiv, als dass sie eine Verbesserung der Leistung durch ein Abweichen von einer ursprünglich als günstig beurteilten Aufgabensequenz vorhersagt. Die Eignung der OM-Sequenz im Hinblick auf die Problemlöseperformanz in Experiment 1 beruht allerdings auf die mit ihr verbundene Förderung von Lernprozessen bei der Aufgabenbearbeitung, während Transferpro-

zesse nicht durch sie unterstützt werden. Eine durch eine Aufgabensequenzierung mögliche Optimierung der Aufgabensequenz im Hinblick auf die Nutzung von Transferbeziehungen kann daher durchaus mit Leistungsverbesserungen einhergehen – vorausgesetzt, entsprechendes Wissen über strukturelle Aufgabenähnlichkeiten ist vorhanden. Dies entspricht der im Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten formulierten Annahme, dass ein Transfer bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben das Erkennen struktureller Ähnlichkeiten voraussetzt (vgl. Abschnitt 3.3).

In einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz sollten Versuchspersonen insgesamt häufiger von der vorgegebenen Präsentationssequenz abweichen, da hier scheinbar (d.h. oberflächlich) unähnliche Aufgaben aufeinander folgen. Diese Vorhersage beruht auf der Annahme, dass Versuchspersonen solche Sequenzen herstellen, bei denen oberflächlich ähnliche Aufgaben nacheinander bearbeitet werden können, auch wenn diese Aufgaben anderen Aufgabenkategorien angehören und daher nur durch die Anwendung unterschiedlicher Prinzipien gelöst werden können. Die Sequenzierung in einer SM-Sequenz sollte mit einer Verschlechterung der Leistung einhergehen (Untersuchungshypothese 13), da ihre Durchführung auf der fälschlichen Annahme beruht, dass zwischen den Aufgaben bestehende Oberflächenähnlichkeiten für die Lösung der Aufgaben relevant sein könnten. Dagegen kann ein Beibehalten einer SM-Sequenz ein Indiz dafür darstellen, dass eine Versuchsperson die strukturellen Ähnlichkeiten aufeinander folgender Aufgaben in dieser Sequenz erkannt hat und beim Problemlösen nutzt.

Zusammenfassend wurde erwartet, dass eine Aufgabensequenzierung häufiger in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz im Vergleich zu einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz zu beobachten sein sollte. Ein Leistungsvorteil durch eine Aufgabensequenzierung gegenüber dem Beibehalten der Präsentationssequenz als Bearbeitungsreihenfolge sollte dagegen nur in der nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz erfolgen, während umgekehrt in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz eine Überlegenheit der Beibehalter gegenüber den Aufgabensequenzierern vorhergesagt wurde (disordinale Interaktion). Es wurde folglich eine klare Dissoziation zwischen der Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung einerseits und den damit verbundenen Performanzverbesserungen andererseits vorhergesagt.

Method

Versuchspersonen. Bei den Versuchspersonen handelte es sich um 40 Studierende (33 weiblich, 7 männlich) verschiedener Fachbereiche der Georg-August-Universität Göttingen und der Universität des Saarlandes. Das mittlere Alter betrug 22,5 Jahre bei einer Spannweite von 19 bis zu 35 Jahren. Die Versuchspersonen erhielten entweder ein bis zwei Versuchspersonenstunden (für Studierende der Psychologie) oder eine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme an der Untersuchung.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. Es wurde das gleiche Lern- und Problemlösematerial wie in Experiment 1 verwendet. Die Versuchspersonen absolvierten im Anschluss an die Erfassung verschiedener soziodemografischer Daten (Alter, Geschlecht, Studienfach, Semesterzahl, Mathenote im Abitur und Art des Mathekurses) zunächst die zwölfminütige Lernphase und mussten dann die neun isomorphen sowie die drei Transferaufgaben lösen. Während die Sequenz der Transferaufgaben erneut fest vorgegeben war und nicht verändert werden durfte, hatten die Versuchspersonen bei der Bearbeitung der isomorphen Aufgaben die Möglichkeit, die Bearbeitungsreihenfolge selbst festzulegen. Hierzu wurde ihnen zunächst eine Instruktion vorgelegt, in der sie aufgefordert wurden, zunächst alle Aufgaben gründlich durchzulesen und sich dann eine Aufgabe auszuwählen, mit deren Bearbeitung sie beginnen möchten. Es wurde explizit darauf hingewiesen, dass die Aufgaben in jeder möglichen Reihenfolge bearbeitet werden können, wobei erneute Lösungsversuche für bereits bearbeitete Aufgaben nicht gestattet waren. Die neun Aufgaben waren überblicksartig auf einem einzelnen Blatt aufgeführt, das im Anschluss an die Instruktion für die Problemlösephase dargeboten wurde. In Abhängigkeit von der Versuchsbedingung wurden die Aufgaben auf diesem Überblicksblatt in einer SM-Sequenz oder aber in einer OM-Sequenz dargeboten. Jede Aufgabe war mit einem Symbol versehen, welches die Versuchspersonen auf den Lösungszetteln notieren sollten, um eine eindeutige Zuordnung der Aufgaben zu den skizzierten Lösungswegen zu ermöglichen. Die Lösungszettel enthielten lediglich die Aufforderung, das jeweilige Aufgabensymbol und den Anfangs- und Endzeitpunkt der Aufgabenbearbeitung zu notieren, sowie den erneuten Hinweis, dass die Aufgaben in jeder beliebigen Reihenfolge bearbeitet werden könnten. Um eine Aufgabe zur Bearbeitung

auszuwählen, musste die Versuchsperson also jeweils auf das Überblicksblatt, das alle Aufgabenstellungen enthielt, zurückgreifen.

Im Anschluss an die Bearbeitung der isomorphen Testaufgaben mussten zum Abschluss des Experiments die drei Transferaufgaben in einer für alle Versuchspersonen identischen Reihenfolge bearbeitet werden.

Versuchsdesign. Als unabhängige Variable wurde die *Präsentationssequenz* der neun isomorphen Aufgaben auf dem Überblicksblatt variiert. Es wurden wie in Experiment 1 drei nach Strukturmerkmalen geblockte Sequenzen (*SM-Sequenzen*) realisiert, bei denen die Aufgaben gemäß ihrer Zugehörigkeit zu einer der drei Aufgabekategorien gruppiert waren. Die drei SM-Sequenzen unterschieden sich in der Abfolge der Aufgabekategorien, und die Daten wurden über diese drei Abfolgen hinweg aggregiert und mit den gemittelten Werten der drei nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenzen (*OM-Sequenzen*) verglichen. Die insgesamt sechs Präsentationssequenzen dieses Experiments entsprechen den Bearbeitungsreihenfolgen aus Experiment 1. Im Unterschied zu Experiment 1 war jedoch bei dem vorliegenden Experiment ein Abweichen von den vorgegebenen Präsentationssequenzen bei der Aufgabenbearbeitung möglich. Die interindividuelle Bedingungsvariation resultierte in einem Zwei-Gruppen Design, wobei innerhalb der beiden Experimentalbedingungen Versuchspersonen zusätzlich danach unterschieden wurden, ob sie eine Aufgabensequenzierung vorgenommen hatten oder ob sie die Präsentationssequenz als Bearbeitungsreihenfolge beibehalten hatten. Diese Unterscheidung zwischen *Sequenzieren* und *Beibehalten* wurde als zweiter Faktor in die statistischen Analysen einbezogen.

Abhängige Variablen. Als abhängige Variablen wurden zunächst die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Aufgaben* (insgesamt sowie getrennt für die Performanz bei der Bearbeitung korrespondierender bzw. nicht-korrespondierender Aufgaben), die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben* sowie die *Bearbeitungszeiten* für diese beiden Abschnitte der Problemlösephase registriert. Die Bewertung der Aufgabenlösungen wurde nach dem für Experiment 1 beschriebenen Bewertungsschema vorgenommen. Zusätzlich wurde für jede Versuchsperson bestimmt, ob sie eine Aufgabensequenzierung vorgenommen hatte oder nicht.

Ergebnisse

Überprüfung der Vergleichbarkeit der Eingangsvoraussetzungen. In einem ersten Schritt wurden die beiden Präsentationssequenzbedingungen mit Hilfe einer ein-faktoriellen Varianzanalyse hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit bezüglich der mit der Kursart gewichteten Mathenoten im Abitur überprüft, wobei sich keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen ergaben (OM-Sequenz: $M = 2,28$; SM-Sequenz: $M = 2,08$; $F < 1$). Auch in diesem Experiment ergaben sich ähnlich wie in Experiment 1 teilweise sehr hohe Korrelationen zwischen der gewichteten Mathenote bzw. dem Geschlecht und verschiedenen Performanzmaßen (z.B. gewichtete Mathenote und Gesamtperformanz: $r = -.51$; $p = .001$; Geschlecht und Gesamtperformanz: $r = .31$; $p < .10$; jeweils $N = 40$), wobei bessere Mathematiknoten sowie männliches Geschlecht mit höheren Performanzwerten assoziiert waren. Daher wurden erneut beide Variablen als Kovariaten in die varianzanalytische Auswertung übernommen. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse bezüglich des Sequenzierungsverhaltens berichtet, während anschließend die Leistungsdaten (Problemlöseperformanz, Bearbeitungsdauer) in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz der Aufgaben und dem Sequenzierungsverhalten dargestellt werden.

Sequenzierungsverhalten. Entgegen der ursprünglich formulierten Vermutung, dass eine eigenständige Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge für isomorphe Testaufgaben vor allem bei Präsentation der Aufgaben in einer SM-Sequenz beobachtbar sein würde, zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Sequenzbedingungen hinsichtlich des Sequenzierungsverhaltens (Tabelle 18; $\chi^2(1) = 0,48$; $p > .40$). Insgesamt war die Anzahl von Versuchspersonen, die von der Präsentationssequenz der Aufgaben abwichen, sehr gering. Dies sollte bei der Interpretation der weiteren Analysen, in denen das Sequenzierungsverhalten als zweiter Faktor einbezogen wurde, berücksichtigt werden, da in zwei Fällen sehr kleine Zellenbesetzungen ($n = 5$ bzw. 7 ; vgl. Tabelle 18) resultierten.

Tabelle 18: Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz

	SM-Sequenzen	OM-Sequenzen
Sequenzierer	5	7
Beibehalter	15	13

Problemlöseperformanz. Eine Analyse der *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben* (linke Hälfte von Abbildung 8) mit Hilfe einer zweifaktoriellen ANCOVA (Präsentationssequenz x Sequenzierungsverhalten; Mathenote und Geschlecht als Kovariaten) erbrachte keinen Haupteffekt der Präsentationssequenz ($F(1,34) = 1,70$; $MSE = 374,62$; $p = .20$) oder des Sequenzierungsverhaltens ($F(1,34) = 2,59$; $MSE = 374,62$; $p > .10$). Die Interaktion war mit $F(1,34) = 2,85$; $MSE = 374,62$; $p = .10$ nur marginal signifikant: Versuchspersonen, die in der OM-Sequenz eine Aufgabensequenzierung vorgenommen hatten, zeigten erwartungsgemäß deutlich bessere Leistungen als Versuchspersonen, die die Präsentationssequenz beibehalten hatten ($t(18) = 4,03$; $p = .001$; zweiseitig), während keine Effekte der Aufgabensequenzierung in der SM-Sequenz feststellbar waren ($t(18) = 0,28$; $p > .70$; zweiseitig). In der ANCOVA erwies sich nur die Mathenote der Versuchspersonen als bedeutsame Kovariate (Mathenote: $F(1,34) = 4,46$; $MSE = 374,62$; $p < .05$; Geschlecht: $F(1,34) = 1,13$; $MSE = 374,62$; $p > .20$).

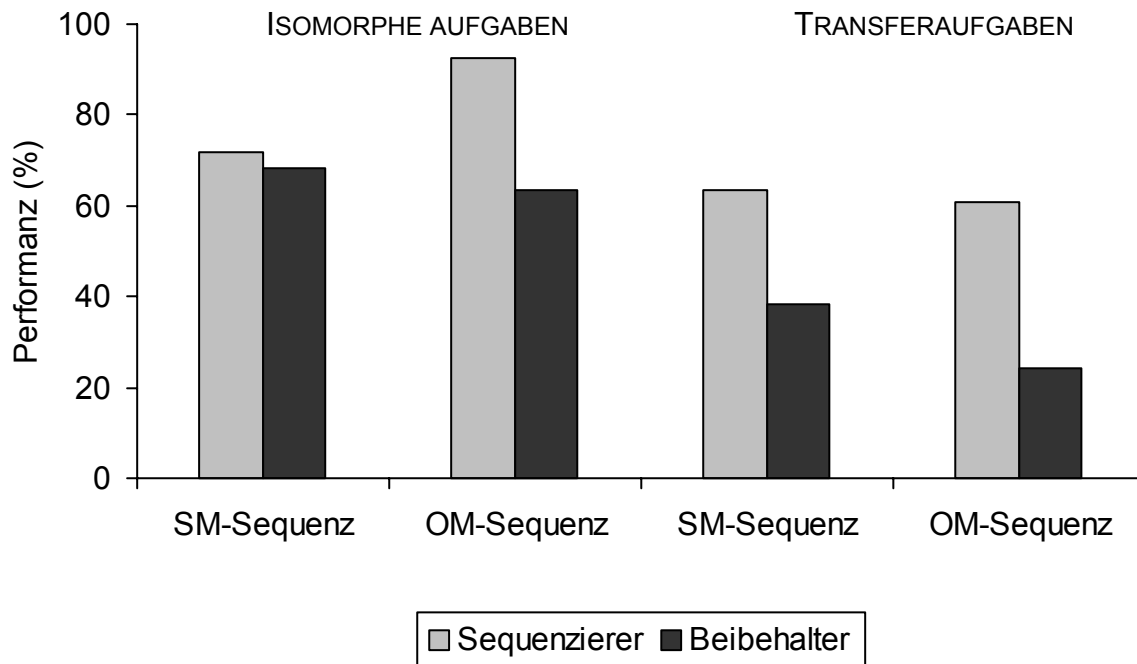


Abbildung 8: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung isomorpher und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens

Eine genauere Analyse der Leistung bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben zeigte, dass eine Umsequenzierung der Aufgaben die *Performanz bei der Bearbeitung korrespondierender Aufgaben* erhöhte ($F(1,34) = 4,28$; $MSE = 655,97$; $p < .05$; linke Hälfte von Abbildung 9). Ein Effekt der Präsentationssequenz war dagegen nicht nachweisbar ($F < 1$). Eine tendenziell signifikante Interaktion des Sequenzierungsverhaltens und der Präsentationssequenz ($F(1,34) = 3,15$; $MSE = 655,97$; $p < .10$) verwies darüber hinaus darauf, dass diese Performanzverbesserung durch Sequenzierung nur dann auftrat, wenn von einer OM-Sequenz abgewichen wurde ($t(18) = 3,32$; $p < .01$; zweiseitig), während keinerlei Verbesserung durch die Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge bei einer SM-Sequenz beobachtet werden konnte ($t(18) = 0,29$; $p > .70$; zweiseitig). Keine der Kovariaten hatte einen Einfluss auf dieses Performanzmaß (beide $F < 1$).

Für die *Performanz bei der Bearbeitung nicht-korrespondierender Aufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 9) war dagegen weder ein Haupteffekt der Präsentationssequenz ($F(1,34) = 1,48$; $MSE = 427,32$; $p > .20$), des Sequenzierungsverhaltens ($F < 1$) noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren nachweisbar ($F(1,34) = 1,62$;

$MSE = 427,32$; $p > .20$). Nur die Mathenote als Kovariate hatte einen statistisch bedeutsamen Einfluss auf die Bearbeitungsleistung (Mathenote: $F(1,34) = 6,45$; $MSE = 427,32$; $p < .05$; Geschlecht: $F(1,34) = 2,10$; $MSE = 427,32$; $p > .15$).

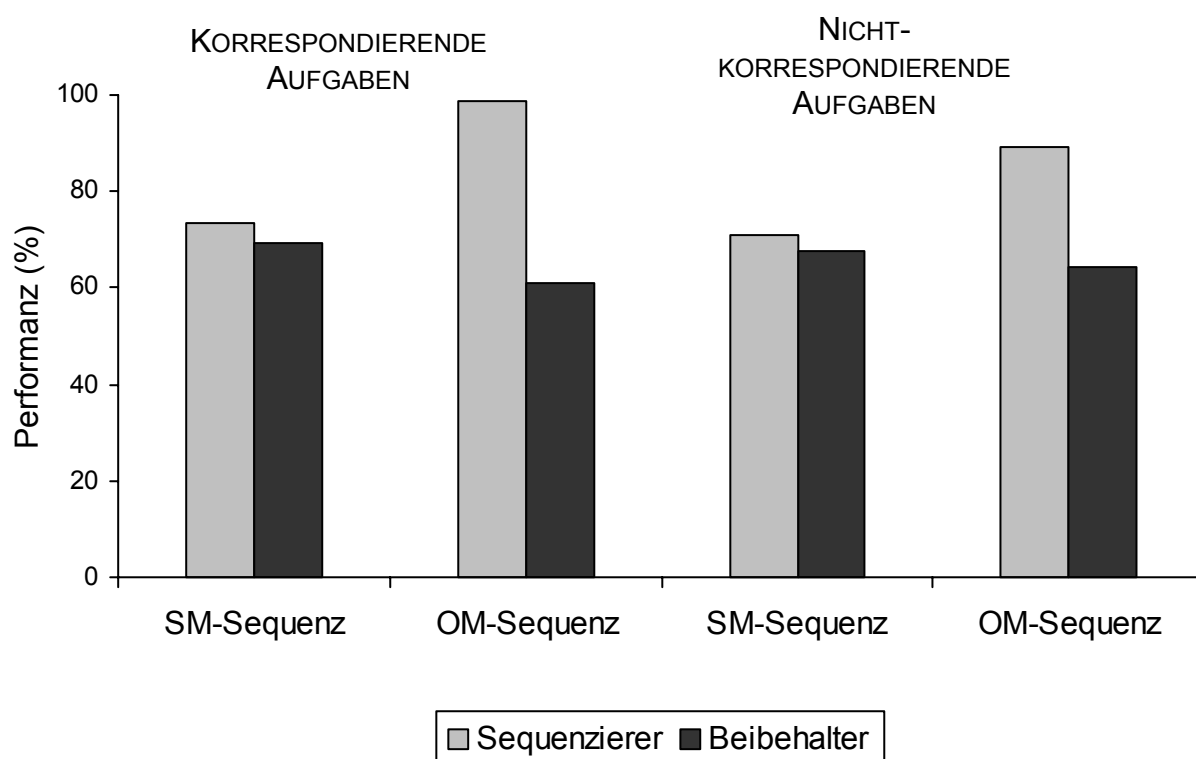


Abbildung 9: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung korrespondierender und nicht-korrespondierender Aufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens

Für die *Performanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 8) zeigte sich hingegen, dass weniger Fehler gemacht wurden, wenn die Versuchspersonen zuvor bei der Bearbeitung der isomorphen Aufgaben von der Präsentationssequenz für diese Aufgaben abgewichen waren als wenn sie diese beibehalten hatten ($F(1,33) = 4,55$; $MSE = 700,77$; $p < .05$). Dagegen war kein Effekt der Präsentationssequenz und keine Interaktion zwischen der Präsentationssequenz und dem Sequenzierungsverhalten nachweisbar (beide $F < 1$). Lediglich bei der Mathenote handelte es sich um eine statistisch bedeutsame Kovariate (Mathenote: $F(1,33) = 9,61$; $MSE = 700,77$; $p < .01$; Geschlecht: $F(1,33) = 2,53$; $MSE = 700,77$; $p > .10$).

Bearbeitungsdauer. Auch in diesem Experiment hatten die Versuchspersonen teilweise vergessen, die Zeitpunkte des Beginns und der Beendigung der einzelnen Aufgabebearbeitungen zu notieren.

Für die *Bearbeitungsdauer für isomorphe Testaufgaben* (linke Hälfte von Abbildung 10) fehlten daher die Daten von 7 Versuchspersonen. Für die übrigen 33 Versuchspersonen ergab sich ein sehr deutlich ausgeprägter Sequenzeffekt ($F(1,27) = 14,34$; $MSE = 664644,55$; $p = .001$). Versuchspersonen, denen die Aufgaben in einer der OM-Sequenzen präsentiert worden waren, waren wesentlich schneller als solche, denen die Aufgaben in einer der SM-Sequenzen dargeboten worden waren. Dagegen war kein Effekt des Sequenzierungsverhaltens nachweisbar ($F < 1$); die Interaktion zwischen beiden Faktoren verfehlte die Signifikanzgrenze ($F(1,27) = 1,88$; $MSE = 664644,55$; $p > .15$). Die beiden Kovariaten erwiesen sich als statistisch bedeutungslos (Mathenote: $F(1,27) = 2,56$; $MSE = 664644,55$; $p > .10$; Geschlecht: $F(1,27) = 1,20$; $MSE = 664644,55$; $p > .20$).

Für die *Bearbeitungsdauer für Transferaufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 10), deren Analyse auf den Daten von 35 Versuchspersonen beruht, ergaben sich hingegen keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz oder dem Sequenzierungsverhalten (alle $F < 1$). Auch die Kovariaten hatten keinen nennenswerten Einfluss auf die Bearbeitungszeit (Mathenote: $F < 1$; Geschlecht: $F(1,29) = 1,86$; $MSE = 290715,86$; $p > .15$).

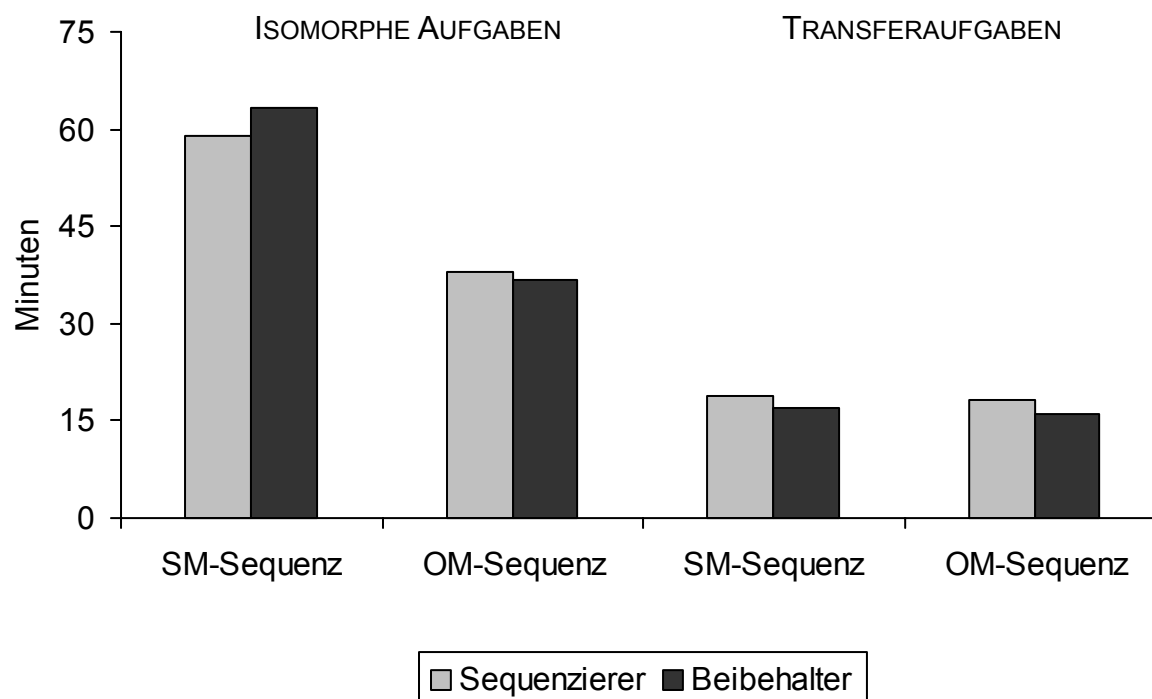


Abbildung 10: Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des Sequenzierungsverhaltens

Zusammenfassung und Diskussion

In Experiment 2 wurde der Frage nachgegangen, wie die Anordnung von zu bearbeitenden Aufgaben entweder nach ihrer Zugehörigkeit zu einer durch die Strukturmerkmale definierten Aufgabenkategorie oder aber nach ihrer semantischen Einbettung die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung sowie damit verbundene Performanzveränderungen beeinflusst. Es zeigte sich, dass die Häufigkeit, mit der eine Aufgabensequenzierung vorgenommen wurde, in diesem Experiment insgesamt nur gering war, so dass nach diesen Ergebnissen gewisse Zweifel an der Untersuchungshypothese 8 berechtigt erscheinen (vgl. aber Abschnitt 6.4). Vor allem aber wurde das Sequenzierungsverhalten auch nicht durch die Präsentationssequenz beeinflusst. Die ursprünglich getroffene Vorhersage, dass eine Aufgabensequenzierung häufiger in der nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz zu beobachten sein sollte, konnte demnach nicht bestätigt werden (Untersuchungshypothese 11).

Leistungsvorteile von Problemlösern, die eine Aufgabensequenzierung vornahmen gegenüber solchen Personen, die die Präsentationssequenz für die Bearbeitung der Aufgaben beibehielten, traten vor allem in zwei Formen auf. Erstens konnte in Experiment 2 nachgewiesen werden, dass ein Leistungsvorteil durch eine Aufgabensequenzierung bei isomorphen Aufgaben (und dort insbesondere bei korrespondierenden Aufgaben) erwartungsgemäß nur dann auftrat, wenn die Aufgaben nach Oberflächenmerkmalen geblockt dargeboten wurden (Untersuchungshypothese 12). Dies sollte der Fall sein, da hier vermutlich eine Aufgabensequenzierung auf dem Erkennen struktureller Unterschiede zwischen aufeinander folgenden und oberflächlich ähnlichen Aufgaben beruht. Diese Ergebnisse stützen die Konzeption von Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie, die eingesetzt werden kann, um im Hinblick auf einen analogen Transfer ungünstige Problemlösebedingungen zu verbessern (vgl. Kapitel 4). Dagegen konnte nicht bestätigt werden, dass eine Aufgabensequenzierung im Fall einer nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz zu Leistungsbeeinträchtigungen führt, da sie an vermeintlich relevanten Oberflächenmerkmalen orientiert ist (Untersuchungshypothese 13).

Auffallend und unerwartet ist, dass eine Aufgabensequenzierung zweitens nicht nur die Problemlöseperformanz für diejenigen Aufgaben beeinflusste, für die eine Sequenzierung vorgenommen wurde, sondern dass sich darüber hinaus Auswirkungen auf die Leistung bei der anschließenden Bearbeitung der Transferaufgaben nachweisen ließen. Dieser Befund bestand unabhängig von der Art der Präsentationssequenz der isomorphen Aufgaben. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnismuster besteht darin, dass die Instruktion zur Aufgabensequenzierung eine tiefere Auseinandersetzung mit den zu bearbeitenden isomorphen Aufgaben bewirkt, bei der die Aufgaben einzeln und dann in Relation zueinander analysiert werden, um anschließend eine Aufgabe zur Bearbeitung auszuwählen und damit eine eigene Bearbeitungssequenz festzulegen. Die bessere Leistung von Sequenzierern bei der Bearbeitung der Transferaufgaben geht daher möglicherweise auf elaboriertere und stärker an Strukturmerkmalen orientierte Wissensstrukturen dieser Personengruppe zurück, die diese bei der Sequenzierung der isomorphen Aufgaben erworben haben und die letztlich eine Adaption bekannter Lösungswege ermöglichen (Catrambone, 1998, Renkl, 1997). Diese Effekte einer Aufgabensequenzierung können damit unabhängig von der Art der vorgegebenen Aufgabensequenz auftreten.

Das im nächsten Abschnitt berichtete dritte Experiment baut auf den bereits geschilderten Experimenten auf, indem der Frage nachgegangen wird, welche Auswirkungen Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten auf Sequenz- und Sequenzierungseffekte haben. Der wesentliche Befund in Experiment 1 bestand darin, dass eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz im Vergleich zu einer nach Strukturmerkmalen geblockten Bearbeitungssequenz die Problemlöseperformanz fördert, indem sie im Sinne der *near-miss* Erklärung das Erkennen struktureller Aufgabenmerkmale unterstützt. In Experiment 2 wurde darüber hinaus gezeigt, dass eine Aufgabensequenzierung nur bei einer OM-Präsentationssequenz zu Leistungsverbesserungen führt, wobei diese Aufgabensequenzierung vermutlich auf der Erkenntnis beruht, dass es sich bei den nacheinander präsentierten oberflächlich ähnlichen Aufgaben um Aufgaben mit variierenden Strukturmerkmalen handelt. Sowohl für die Entstehung von Sequenzeffekten in Experiment 1 als auch für das Auftreten von Sequenzierungseffekten in Experiment 2 wird folglich dem Erkennen von Strukturmerkmalen der zu bearbeitenden Aufgaben eine entscheidende Rolle zugewiesen, so dass es von Interesse ist, wie Maßnahmen, die diesen Prozess fördern, die genannten Effekte moderieren. In Experiment 3 wurde dieser Frage nachgegangen, indem Problemlöser aufgefordert wurden, vor der eigentlichen Aufgabebearbeitung die Aufgaben nach lösungsrelevanten Merkmalen zu kategorisieren und damit ihre Aufmerksamkeit auf strukturelle Ähnlichkeiten der Aufgaben zu richten.

6.3 Experiment 3: Moderation von Sequenz- und Sequenzierungseffekten durch die Fähigkeit zur Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten

In den bislang berichteten Experimenten wurden Sequenz- und Sequenzierungseffekte für entweder nach Strukturmerkmalen oder nach Oberflächenmerkmalen geblockte Präsentationssequenzen untersucht. In Experiment 3 sollte der Frage nachgegangen werden, wie diese Effekte sich verändern, wenn Versuchspersonen vor der eigentlichen Aufgabebearbeitung zunächst aufgefordert werden, die Aufgaben hinsichtlich ihrer strukturellen Ähnlichkeiten miteinander zu vergleichen und aufbauend auf den vermuteten lösungsrelevanten Übereinstimmungen aus diesen Aufgaben Aufgabenkategorien zu bilden. Eine derartige Kategorisierungsaufgabe richtet

die Aufmerksamkeit auf strukturelle Korrespondenzen zwischen Aufgaben, so dass diese zum Zeitpunkt der eigentlichen Aufgabenbearbeitung bereits bekannt sein sollten und nicht erst während der Problemlösephase erschlossen werden müssen.

Aus dieser Tatsache können zunächst Vorhersagen zum Auftreten von *Sequenzeffekten* abgeleitet werden: Ein wesentlicher Befund aus Experiment 1 bestand darin, dass nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenzen zu besseren Problemlöseleistungen führen als nach Strukturmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenzen, indem sie ein Erkennen der strukturellen Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Aufgaben ermöglichen und damit ein Lernen bei der Aufgabenbearbeitung unterstützen. Für Experiment 3 wurde angenommen, dass sich dieser Bearbeitungsvorteil einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz nicht mehr zeigen lässt, wenn die Strukturmerkmale der Aufgabe bereits während der Kategorisierungsaufgabe identifiziert wurden. Stattdessen kann vorhergesagt werden, dass bei vorgehaltener Kategorisierungsaufgabe eine nach Strukturmerkmalen geblockte Präsentationssequenz mit besseren Leistungen verbunden sein sollte (Untersuchungshypothesen 2 und 3). Da nämlich die Ausprägungen der strukturellen Merkmale auf Grund der Kategorisierungsaufgabe zum Zeitpunkt der Aufgabenbearbeitung bereits bekannt sein sollten, können identifizierte strukturelle Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben im Sinne eines Wissenstransfers für die Aufgabenbearbeitung genutzt werden. Gleichzeitig wird die Gefahr, dass sich Versuchspersonen bei einer nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz zu stark an divergierenden, aber lösungsirrelevanten Oberflächenmerkmalen orientieren, reduziert. Im Hinblick auf Sequenzeffekte wird folglich vorhergesagt, dass es zu einer Umkehrung des in Experiment 1 beobachteten Sequenzeffekts kommt, indem nach Strukturmerkmalen geblockte Sequenzen gegenüber nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenzen zu besseren Leistungen führen (Untersuchungshypothese 4), wenn Versuchspersonen zunächst aufgefordert werden, die zu bearbeitenden Aufgaben nach Strukturmerkmalen zu kategorisieren.

Die Tatsache, dass die vorherige Kategorisierung von Aufgaben dazu führen kann, dass Wissen über strukturelle Ähnlichkeiten und Unterschiede von Aufgaben bereits zum Zeitpunkt der Aufgabenbearbeitung vorliegt, hat auch Implikationen für die Vorhersage von *Sequenzierungseffekten*:

Die Ergebnisse von Experiment 2 zur Sequenzierung von Algebraaufgaben können dahin gehend interpretiert werden, dass allein das Befolgen einer Instruktion, in

der die Festlegung einer eigenen Bearbeitungsreihenfolge als Handlungsoption betont wird, einen Vergleich der zu bearbeitenden Aufgaben hinsichtlich struktureller Merkmale anstößt und damit den Erwerb von Wissen über strukturelle Ähnlichkeiten fördert. Wenn eine Aufgabenkategorisierung ebenfalls diesen Identifikationsprozess unterstützt, dann sollten von der Präsentationssequenz unabhängige Sequenzierungseffekte, wie sie z.B. in Experiment 2 für die Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben beobachtet wurden, nicht mehr auftreten, wenn die Aufgaben zunächst kategorisiert werden müssen. Versuchspersonen sollten dann nämlich keinen zusätzlichen Nutzen aus einer tieferen Verarbeitung der Aufgaben bei der Aufgabensequenzierung ziehen, da auf Grund der Aufgabenkategorisierung bereits Wissen über die strukturellen Merkmale der Aufgaben vorliegt. Sequenzierungseffekte in Abhängigkeit von der Art der Präsentationssequenz der Aufgaben können dagegen auch bei vorheriger Bearbeitung einer Kategorisierungsaufgabe auftreten. Dieser Fragenkomplex beschäftigt sich demnach mit Untersuchungshypothese 15, in der von einer Moderation von Sequenzierungseffekten durch Maßnahmen zur Förderung struktureller Ähnlichkeiten ausgegangen wird.

Sowohl die bislang formulierten Vorhersagen für Sequenzeffekte als auch die für unspezifische Sequenzierungseffekte beruhen auf der idealisierenden Annahme, dass Versuchspersonen hinreichend in der Lage sind, strukturelle Ähnlichkeiten während der Aufgabenkategorisierung zu erkennen und zu nutzen. Es wird daher zusätzlich angenommen, dass beide Effekte durch die Qualität der durch die Versuchspersonen vorgenommenen Aufgabenkategorisierung und damit durch das Ausmaß an Vorwissen moderiert werden: Wenn Versuchspersonen eine gute Leistung bei der Aufgabenkategorisierung zeigen, wenn sie also die Aufgaben überwiegend nach strukturellen Merkmalen sortieren, sollte sich der vorhergesagte und gegenüber Experiment 1 invertierte Sequenzeffekt zu Gunsten der nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz ergeben (Untersuchungshypothese 6), und eine Aufgabensequenzierung sollte mit besseren Problemlöseleistungen verbunden sein.

Wenn Versuchspersonen dagegen eine schlechte Kategorisierungsleistung erbringen, dann sollten Sequenzeffekte nicht auftreten oder sollten im Sinne der in Experiment 1 bestätigten *near-miss* Erklärung zugunsten einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz ausfallen. Bei einer schlechten Kategorisierungsleistung sind dagegen Leistungsverbesserungen durch eine Aufgabensequenzierung lediglich unabhängig von der Präsentationssequenz zu erwarten. Die angesprochene Modera-

tion von Sequenzierungseffekten mit dem domänenspezifischen Vorwissen der Versuchspersonen, wie es in der Fähigkeit zur Aufgabenkategorisierung zum Ausdruck kommt, betrifft die Untersuchungshypothese 14.

Versuchspersonen. Bei den Versuchspersonen handelte es sich um 40 Studierende (29 weiblich, 11 männlich) verschiedener Fachbereiche der Universität des Saarlandes. Das mittlere Alter betrug 25,03 Jahre bei einer Spannweite von 19 bis zu 48 Jahren. Die Versuchspersonen erhielten entweder die für das Psychologiestudium benötigten ein bis zwei Versuchspersonenstunden oder eine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme an der Untersuchung.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. Es wurde das gleiche Lern- und Problemlösematerial wie in Experiment 1 und 2 verwendet. Die Versuchspersonen absolvierten im Anschluss an die Erhebung verschiedener soziodemografischer Daten zunächst die zwölfminütige Lernphase. Ähnlich wie in Experiment 2 erhielten sie nach Abschluss der Lernphase ein Blatt, auf dem die zu bearbeitenden isomorphen Testaufgaben in Abhängigkeit von der experimentellen Bedingung in einer der sechs realisierten Präsentationssequenzen (drei SM-Sequenzen, drei OM-Sequenzen) dargestellt waren. Jede Aufgabe war wie in Experiment 2 mit einem Symbol versehen, um in der anschließenden Problemlösephase eine eindeutige Zuordnung der Aufgaben zu den skizzierten Lösungswegen zu ermöglichen. Zusätzlich war für jede der neun Aufgaben ein freies Feld eingezeichnet, welches für die Kategorisierungsaufgabe benötigt wurde.

Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, vor der eigentlichen Aufgabenbearbeitung die Aufgaben zu klassifizieren. Dabei sollten sie solche Aufgaben zu einer Kategorie zusammenfassen, die sich hinsichtlich ihrer mathematischen Eigenschaften ähnlich waren, d.h. die sich nach Auffassung der Versuchspersonen in ähnlicher Weise lösen ließen. Es wurde darauf verwiesen, dass so viele Kategorien gebildet werden konnten, wie es der Versuchsperson sinnvoll erschien und dass die Anzahl der Aufgaben pro Kategorie nicht für jede der Kategorien identisch sein müsse. Um ähnliche Aufgaben einer Kategorie zuzuordnen, sollten die Versuchspersonen diese Aufgaben in dem dafür vorgesehenen Feld mit einem Großbuchstaben kennzeichnen, wobei jeder Großbuchstabe für eine Kategorie stehen sollte und Aufgaben, die mit dem gleichen Großbuchstaben gekennzeichnet würden, in die gleiche Kategorie gehörten. Dieses Verfahren wurde zusätzlich an einem Beispiel aus einem anderen

Inhaltsbereich verdeutlicht. Die Versuchspersonen wurden gebeten, den Zeitpunkt des Beginns und der Beendigung der Aufgabenkategorisierung anzugeben.

Nach Beendigung der Kategorisierungsaufgabe erhielten die Versuchspersonen die bereits in Experiment 2 eingesetzte Instruktion für die Problemlösephase, in der darauf hingewiesen wurde, dass die Aufgaben in jeder beliebigen Reihenfolge bearbeitet werden könnten. Um eine Aufgabe zur Bearbeitung auszuwählen, musste die Versuchsperson jeweils auf den Überblickszettel, der alle Aufgabenstellungen sowie die von den Versuchspersonen getroffenen Zuordnungen zu Aufgabenkategorien enthielt, zurückgreifen. Im Anschluss an die Bearbeitung der isomorphen Testaufgaben mussten die drei Transferaufgaben in fest vorgegebener Sequenz bearbeitet werden.

Versuchsdesign. Als unabhängige Variable wurde die *Präsentationssequenz* der neun isomorphen Aufgaben auf dem Überblicksblatt variiert. Es wurden analog zu Experiment 1 und 2 drei nach Strukturmerkmalen geblockte Sequenzen (*SM-Sequenzen*) realisiert, bei denen die Aufgaben gemäß ihrer Zugehörigkeit zu einer der drei Aufgabenkategorien gruppiert waren. Die Daten wurden über diese drei Abfolgen hinweg aggregiert und mit den gemittelten Werten der drei nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenzen (*OM-Sequenzen*) verglichen. Die interindividuelle Bedingungsvariation resultierte in einem Zwei-Gruppen Design.

Innerhalb dieser beiden Gruppen wurde zusätzlich eine Unterteilung der Versuchspersonen anhand der Qualität der von ihnen vorgenommenen Aufgabenkategorisierung mit Hilfe eines Mediansplits vorgenommen. Für die Bestimmung der *Qualität der Aufgabenkategorisierung* wurde auf ein von Quilici und Mayer (1996) eingeführtes Maß zurückgegriffen. Dieser so genannte *structure score* gibt an, inwieweit eine Sortierung der Aufgaben nach Strukturmerkmalen vorgenommen wurde. Er wurde bestimmt, indem zunächst für jedes der 36 möglichen Aufgabenpaare ($9 \times 8/2 = 36$) angegeben wurde, ob die beiden Aufgaben von einer Versuchsperson der gleichen Aufgabenkategorie zugeordnet wurden (kodiert mit 1) oder nicht (kodiert mit 0). Von diesen 36 möglichen Aufgabenpaaren wiesen die in neun Paaren enthaltenen Aufgaben identische Strukturmerkmale auf. Die Aufgaben von neun weiteren Paaren waren identisch hinsichtlich der Oberflächenmerkmale und 18 Paarlinge wiesen weder Übereinstimmungen hinsichtlich Oberflächen- noch Strukturmerkmalen auf. Um den *structure score* zu bestimmen, wurde die Anzahl der von einer Versuchsperson

gebildeten, auf strukturellen Ähnlichkeiten beruhenden Paare bestimmt und an der Anzahl möglicher, auf strukturellen Ähnlichkeiten beruhender Paare (9) relativiert. Der resultierende Wert wurde in einen Prozentsatz transformiert. Anhand des *structure scores* wurde innerhalb der beiden Sequenzbedingungen jeweils ein Mediansplit vorgenommen, und die resultierende Unterscheidung zwischen guten und schlechten Kategorisierern wurde als weiterer Faktor in die statistischen Analysen mit einbezogen.

Als dritter Faktor wurde das *Sequenzierungsverhalten* der Versuchspersonen bestimmt, indem wie in Experiment 2 zwischen Sequenzierern und Beibehaltern unterschieden wurde.

Abhängige Variablen. Es wurden die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Aufgaben* (insgesamt und getrennt nach der Performanz für korrespondierende und nicht-korrespondierende Aufgaben) und die *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben* sowie die *Bearbeitungszeiten* für diese beiden Abschnitte der Problemlösephase registriert. Die Bewertung der Aufgabenlösungen wurde nach dem für Experiment 1 beschriebenen Bewertungsschema vorgenommen. Zusätzlich wurde für die Analyse des Sequenzierungsverhaltens für jede Versuchsperson bestimmt, inwieweit sie von der vorgegebenen Präsentationssequenz der Aufgaben abgewichen war oder nicht.

Ergebnisse

Überprüfung der Vergleichbarkeit der Eingangsvoraussetzungen. Zunächst wurden die beiden Präsentationssequenzbedingungen mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit bezüglich der mit der Kursart gewichteten Mathenoten der Versuchspersonen sowie bezüglich ihrer Leistung bei der Aufgabenkategorisierung überprüft. Es ergaben sich keine statistisch bedeutsamen Unterschiede (gewichtete Mathenote: OM-Sequenz: $M = 2,48$; SM-Sequenz: $M = 1,88$; $F(1,38) = 2,60$; $MSE = 1,38$; $p > .10$; *structure score*: OM-Sequenz: $M = 42,78$; SM-Sequenz: $M = 50,00$; $F < 1$). Eine anschließende Korrelationsanalyse zeigte, wie in den vorherigen Experimenten sowohl Korrelationen zwischen der gewichteten Mathenote als auch zwischen dem Geschlecht und verschiedenen Performanzmaßen (z.B. gewichtete Mathenote und Gesamtperformanz: $r = -.47$; $p < .01$; Geschlecht und Gesamtperformanz: $r = .36$; $p < .05$; jeweils $N = 40$) bestanden, wobei bessere

Mathematiknoten sowie männliches Geschlecht mit höheren Punktwerten assoziiert waren. Daher wurden erneut beide Variablen als Kovariaten in die varianzanalytische Auswertung übernommen.

Sequenzierungsverhalten. Eine Klassifizierung von Versuchspersonen nach ihrem Sequenzierungsverhalten zeigte, dass nur sehr wenige Versuchspersonen überhaupt eine Sequenzierung der isomorphen Testaufgaben vorgenommen hatten (Tabelle 18). Zwischen den Sequenzbedingungen ergaben sich wie in Experiment 2 keine statistisch bedeutsamen Unterschiede hinsichtlich des Sequenzierungsverhaltens ($\chi^2(1) = 1,29; p > .20$). Auf Grund der gegenüber Experiment 2 noch einmal reduzierten, geringen Anzahl von Sequenzierern wurde auf eine Verwendung des Sequenzierungsverhaltens als Faktor in der anschließenden statistischen Auswertung verzichtet. Auf der Ebene der Haupteffekte ergaben sich keinerlei statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen Sequenzierern und Beibehaltern hinsichtlich der Problemlöseperformanz (ANCOVA mit Präsentationssequenz x Sequenzierungsverhalten: alle $F < 1$).

Tabelle 19: Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz

	SM-Sequenzen	OM-Sequenzen
Sequenzierer	3	6
Beibehalter	17	14

Problemlöseperformanz. Es wurde vorhergesagt, dass sich Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Qualität der Aufgabenkategorisierung ergeben sollten. Um diese Vorhersage zu prüfen, wurden Versuchspersonen jeweils innerhalb der beiden Sequenzbedingungen anhand eines Mediansplits für den *structure score* in gute bzw. schlechte Kategorisierer unterteilt, und die resultierende zweistufige Variable wurde als zweite unabhängige Variable in die kovarianzanalytische Auswertung (Präsentationssequenz x Qualität der Aufgabenkategorisierung mit Mathenote und Geschlecht als Kovariaten) übernommen.

Eine Analyse der *Problemlöseperformanz bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben* (linke Hälfte von Abbildung 11) mit Hilfe dieser zweifaktoriellen Kovarianzanalyse erbrachte weder einen Haupteffekt der Präsentationssequenz ($F < 1$) noch

der Kategorisierungsqualität ($F(1,34) = 1,17$; $MSE = 421,33$; $p > .25$). Allerdings ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren ($F(1,34) = 4,46$; $MSE = 421,33$; $p < .05$): Versuchspersonen mit schlechter Kategorisierungsleistung zeigten keinen Sequenzeffekt ($t(18) = 0,83$; $p > .40$; zweiseitig), während für Versuchspersonen mit guten Kategorisierungsleistungen bessere Leistungen in den SM-Sequenzen zu beobachten waren, wobei sich der Unterschied jedoch als statistisch nicht bedeutsam erwies ($t(18) = -1,51$; $p > .10$; zweiseitig). In der ANCOVA erwies sich lediglich die Mathenote als bedeutsame Kovariate (Mathenote: $F(1,34) = 8,63$; $MSE = 421,33$; $p < .01$; Geschlecht: $F < 1$).

Eine Ausdifferenzierung der Leistung bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben erbrachte für die *Performanz bei der Bearbeitung korrespondierender Aufgaben* (linke Hälfte von Abbildung 12) weder einen Haupteffekt der Präsentationssequenz noch der Qualität der Aufgabenkategorisierung (beide $F < 1$), und auch die Interaktion verfehlte die Signifikanzgrenze ($F(1,34) = 1,14$; $MSE = 559,08$; $p > .25$). Nur die Mathenote stellte eine statistisch bedeutsame Kovariate dar (Mathenote: $F(1,34) = 7,01$; $MSE = 559,08$; $p < .05$; Geschlecht: $F < 1$).

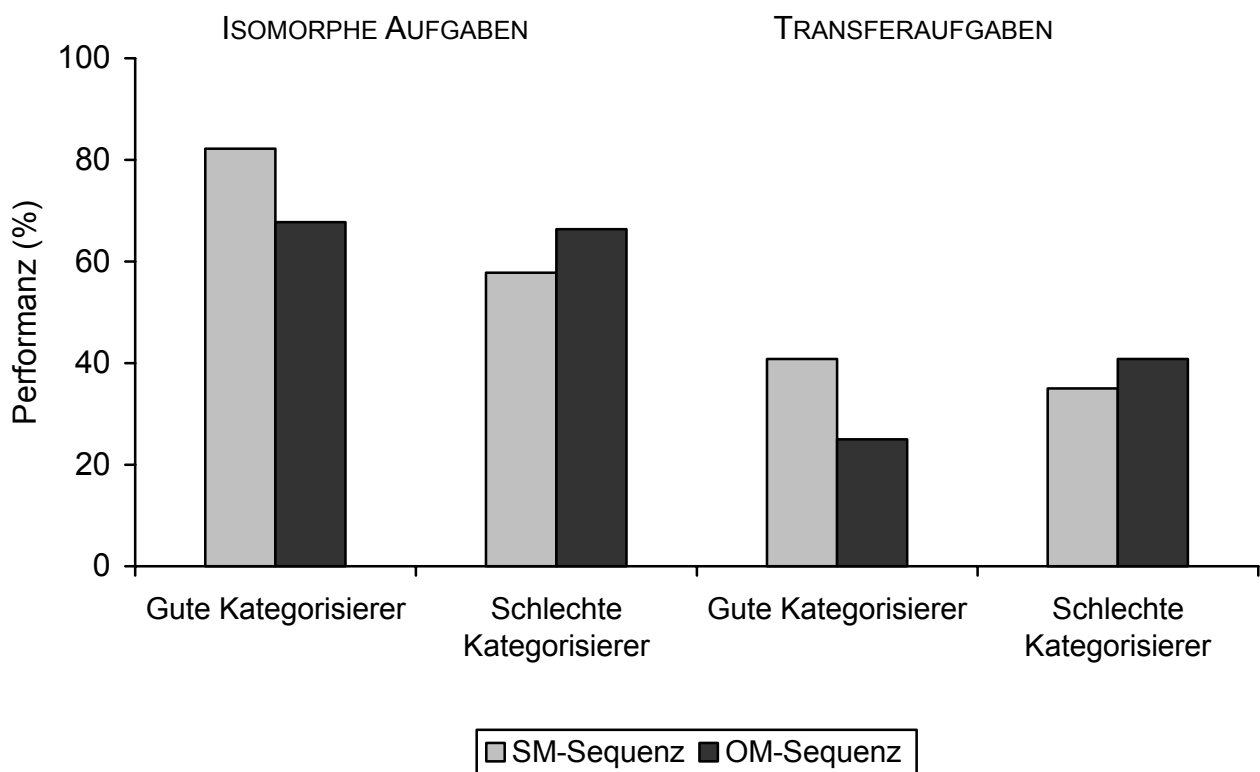


Abbildung 11: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung isomorpher und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Kategorisierungsleistung

Für die *Performanz bei der Bearbeitung nicht-korrespondierender Aufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 12) ließ sich die erwartete Interaktion nachweisen ($F(1,34) = 5,39$; $MSE = 510,27$; $p < .05$), wonach schlechte Kategorisierer keinen Sequenzeffekt zeigten ($t(18) = 0,79$; $p > .40$; zweiseitig), während gute Kategorisierer zumindest tendenziell von einer SM-Sequenz profitierten ($t(18) = -2,03$; $p < .10$; zweiseitig). Die Haupteffekte erwiesen sich als statistisch bedeutungslos (Präsentationssequenz: $F < 1$; Qualität der Aufgabenkategorisierung: $F(1,34) = 1,75$; $MSE = 510,27$; $p > .15$). Lediglich die Kovariate Mathenote hatte einen Einfluss auf die Leistung (Mathenote: $F(1,34) = 6,86$; $MSE = 510,27$; $p < .05$; Geschlecht: $F < 1$).

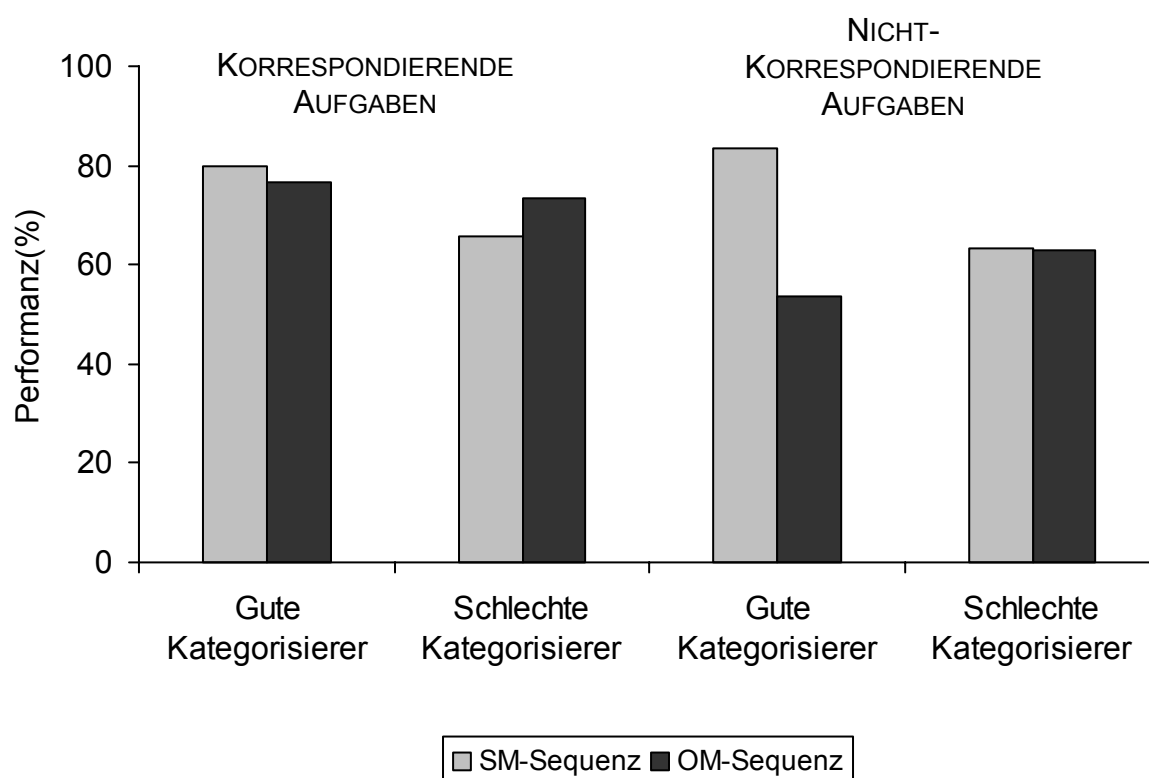


Abbildung 12: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung korrespondierender und nicht-korrespondierender Aufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Qualität der Aufgabenkategorisierung

Für die *Performanz bei der Bearbeitung der Transferaufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 11) zeigte sich ebenfalls kein Effekt der Präsentationssequenz ($F < 1$). Versuchspersonen, die in der Lage gewesen waren, die isomorphen Testaufgaben nach ihren Strukturmerkmalen zu sortieren, zeigten insgesamt bessere Leistungen bei der Bearbeitung der Transferaufgaben, also solche, die eine geringe Kategorisierungsqualität gezeigt hatten ($F(1,34) = 4,78$; $MSE = 567,26$; $p < .05$). Dieser Effekt der Ka-

tegorisierungsqualität ist anhand der in Abbildung 11 dargestellten Mittelwerte nicht nachvollziehbar, da er sich auf Grund der Herauspriorisierung von Unterschieden ergibt, die auf die statistisch hoch bedeutsamen Kovariaten zurückgehen (Mathenote: $F(1,34) = 8,95$; $MSE = 567,26$; $p < .01$; Geschlecht: $F(1,34) = 22,42$; $MSE = 567,26$; $p < .001$). Zusätzlich ergab sich eine signifikante Interaktion ($F(1,31) = 4,14$; $MSE = 567,26$; $p = .05$), deren Ergebnismuster dem für die Leistung bei der Bearbeitung isomorpher Testaufgaben entsprach. Die Einzelvergleiche erwiesen sich jedoch beide als statistisch nicht bedeutsam (schlechte Kategorisierer: $t(18) = 0,39$; $p = .70$; zweiseitig; gute Kategorisierer: $t(18) = -1,12$; $p > .25$; zweiseitig).

Bearbeitungszeiten. Ähnlich wie in den Experimenten 1 und 2 beruhen auch die in Experiment 3 analysierten Mittelwerte für die Bearbeitungszeiten auf einer reduzierten Stichprobe, da 11 Personen bei der Bearbeitung der isomorphen Testaufgaben und 8 Personen bei der Bearbeitung der Transferaufgaben vergessen hatten, die notwendigen Angaben zur Bestimmung der Werte zu machen. Die Befunde sind daher nur bedingt interpretierbar.

Für die *Bearbeitungsdauer für isomorphe Testaufgaben* (linke Hälfte von Abbildung 13) ergab sich kein Sequenzeffekt ($F < 1$). Ebenso wenig konnte ein Effekt der Qualität der Aufgabenkategorisierung nachgewiesen werden ($F(1,23) = 1,17$; $MSE = 911562,43$; $p > .25$) oder eine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F < 1$). Ein Einfluss der beiden Kovariaten konnte nicht beobachtet werden (Mathenote: ($F(1,23) = 1,58$; $MSE = 911562,43$; $p > .20$; Geschlecht: $F < 1$).

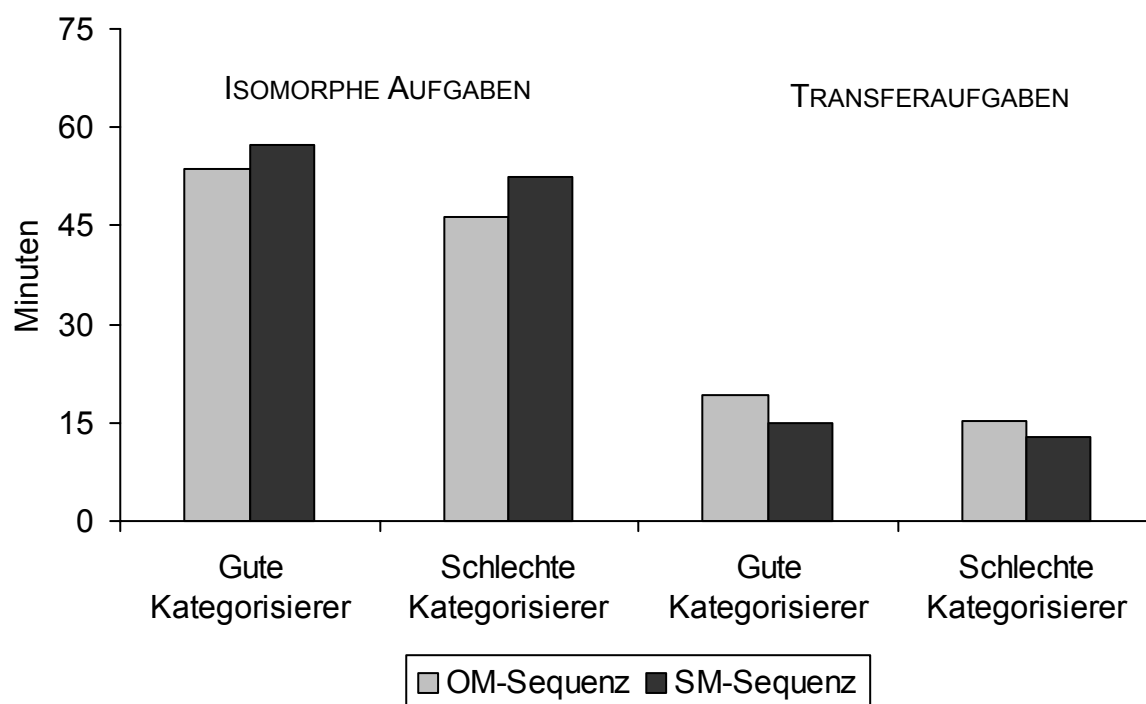


Abbildung 13: Bearbeitungsdauer in Minuten für isomorphe und Transferaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und der Qualität der Aufgabenkategorisierung

Auch für die *Bearbeitungsdauer für Transferaufgaben* (rechte Hälfte von Abbildung 13) ergaben sich keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz ($F(1,26) = 2,16$; $MSE = 138138,20$; $p > .15$) oder der Qualität der Aufgaben ($F(1,26) = 1,14$; $MSE = 138138,20$; $p > .25$). Die Interaktion zwischen beiden Faktoren war ebenfalls statistisch bedeutungslos ($F < 1$). Ein Einfluss der beiden Kovariaten konnte nicht nachgewiesen werden (beide $F < 1$).

Zusammenfassung und Diskussion

Experiment 3 wurde durchgeführt um zu untersuchen, wie eine vorgeschaltete Kategorisierungsaufgabe, mit der die Aufmerksamkeit der Problemlöser auf strukturelle Gemeinsamkeiten und Unterschiede der später zu lösenden Aufgaben gelenkt werden kann, Sequenz- und Sequenzierungseffekte moderiert.

Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz konnten nicht allein dadurch induziert werden, dass die Bearbeitung der Aufgaben im Anschluss an eine Maßnahme erfolgte, mit der vermutlich die Wahrnehmung struktu-

reller Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben gefördert werden kann. Die Untersuchungshypothese 3 konnte damit nicht bestätigt werden. Stattdessen war es im Hinblick auf die Entstehung von Sequenzeffekten entscheidend, wie gut die Kategorisierungsaufgabe bewältigt wurde. Es ergab sich eine Interaktion zwischen der Präsentationssequenz und der Qualität der Aufgabenkategorisierung: Personen mit guten Kategorisierungsleistungen profitierten zumindest tendenziell von der Präsentation der Aufgaben in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz, während sich für schlechte Kategorisierer kein Sequenzeffekt nachweisen ließ. Damit konnte die Untersuchungshypothese 6 bestätigt werden, in der von einer Moderation von Sequenzeffekten durch das Vorwissen der Problemlöser ausgegangen wird.

Dieses Ergebnismuster stützt die zuvor geäußerte Vermutung, dass Versuchspersonen, die durch die Kategorisierungsaufgabe angeregt werden, auf die strukturellen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der zu lösenden Aufgaben zu achten und die diese korrekt identifizieren, nicht weiter von einer OM-Sequenz profitieren. Gute Kategorisierer zeichnen sich vor allem durch ihr Wissen darüber aus, zu welcher Aufgabenkategorie nicht-korrespondierende Aufgaben gehören, deren semantische Einbettung dazu geeignet ist, ein falsches Aufgabenschema bzw. ein ungeeignetes Quellproblem zu aktivieren. Dieses Wissen können sie in der Problemlösephase dazu nutzen, in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz eben diese nicht-korrespondierenden Aufgaben analog zu den zuerst innerhalb eines Aufgabenblocks bearbeiteten korrespondierenden Aufgaben zu lösen (Untersuchungshypothese 4). Für Personen, die bereits über hinreichend Wissen bezüglich der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgaben verfügen, kommt es demnach vermutlich zu einem positiven Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben, auch wenn diese unterschiedliche semantische Einbettungen aufweisen, welcher in einem Leistungsvorteil für die nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz zum Ausdruck kommt.

Versuchspersonen, denen es dagegen nur unzureichend gelingt, in der Kategorisierungsaufgabe die korrekten Zuordnungen zu treffen, fehlt in der anschließenden Problemlösephase hinreichendes Wissen über strukturelle Ähnlichkeiten, um in der nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz nicht-korrespondierende Aufgaben analog lösen zu können. Allerdings zeigen diese Personen auch nicht mehr den in

Experiment 1 beobachteten Vorteil der nach Oberflächenmerkmalen geblockten Präsentationssequenz.

Für das vollständige Verschwinden eines Sequenzeffekts bei schlechten Kategorisierern können zwei verschiedene Erklärungen angeführt werden:

- Erstens kann es sein, dass diese Personen insgesamt über so geringe mathematische Kenntnisse bzw. Fertigkeiten verfügen, dass ihnen auch der kontrastierende Effekt einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Aufgabensequenz nicht hilft, strukturelle Eigenschaften von Aufgaben zu identifizieren. Hinsichtlich der Mathenote ergeben sich jedoch keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen guten und schlechten Kategorisierern, die diese mögliche Erklärung stützen.
- Zweitens ist es möglich, dass es zu einer Überlagerung der beiden gegenläufigen Sequenzeffekte kommt. Die Unterscheidung zwischen guten und schlechten Kategorisierern sagt nichts darüber aus, in welchem Umfang strukturelle Aufgabenmerkmale erkannt sein müssen, um anstelle des Sequenzeffekts zu Gunsten der *near-miss* Hypothese einen auf positiven Transfer beruhenden, umgekehrten Sequenzeffekt zu zeigen. Bei der Fähigkeit zur Wahrnehmung struktureller Eigenschaften handelt es sich um eine kontinuierliche Variable, die durch die Verwendung von Mediansplits künstlich dichotomisiert wird. Es kann also durchaus sein, dass auch durch diese Dichotomisierung definierte so genannte ‚schlechte Kategorisierer‘ trotz ihrer unterdurchschnittlichen Leistungen in der Kategorisierungsaufgabe bereits doch über so viele Kenntnisse bezüglich der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgaben verfügen, dass sie nicht mehr von einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Präsentationssequenz und dem damit verbundenen Kontrasteffekt profitieren. Gleichzeitig sind ihre Kenntnisse über Strukturmerkmale möglicherweise aber auch nicht hinreichend, um zu wissen, welche Aufgaben bzw. wie bestimmte Aufgaben in analoger Weise lösbar sind, so dass es zu dem gefundenen Null-effekt kommen kann.

Letztlich basiert die zweite Erklärung auf einem oftmals bei der Verwendung von Mediansplits methodischen Problem, welches darin besteht, dass die anhand der empirischen Werte getroffenen Gruppendifferenzierungen für eine bestimmte Variable nicht die psychologisch relevanten Abgrenzungen wiedergeben müssen, sondern

einfach durch die Verteilung des betrachteten Merkmals in der untersuchten Stichprobe verursacht sind.

Im Hinblick auf die Annahme, dass eine vorgeschaltete Kategorisierungsaufgabe nicht nur die Entstehung von Sequenzeffekten moderiert, sondern gleichzeitig eine Veränderung des Sequenzierungsverhaltens und dessen Auswirkungen bewirkt, können leider keine Aussagen getroffen werden, da insgesamt nur sehr wenige Personen von der Präsentationssequenz der Aufgaben abwichen. Die Häufigkeit, mit der eine Aufgabensequenzierung vorgenommen wurde, schien dabei ähnlich wie in Experiment 2 nicht von der Art der Präsentationssequenz beeinflusst zu sein. Die möglichen Ursachen für diese geringe Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung, die auch eine Interpretation des Ausbleibens von Unterschieden zwischen den Sequenzbedingungen einschränken, werden in Abschnitt 6.4 diskutiert.

6.4 Fazit zu Sequenzeffekten und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben

Fasst man die im Hinblick auf die Entstehung von Sequenzeffekten wesentlichen Befunde der Experimente 1 bis 3 zusammen, so weisen diese vor allem darauf hin, dass es für die Vorhersage von Sequenzeffekten entscheidend ist, sowohl die verantwortlichen Wirkmechanismen als auch relevante Bedingungen bzw. Variablen zu kennen, die einen Einfluss auf diese Wirkmechanismen haben können. Das in Abschnitt 3.3 formulierte integrative Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten bietet eine Spezifikation genau dieser Wirkmechanismen und Bedingungen und wird damit durch verschiedene empirische Befunde gestützt:

- Erstens bestätigen die Ergebnisse, dass Variationen der Bearbeitungsreihenfolge von Aufgaben mit kreuzvariierenden Oberflächen- und Strukturmerkmalen bedeutsam für die Entstehung von Sequenzeffekten sind (Untersuchungshypothesen 4 und 5). Die Tatsache, dass sich Befunde und Modelle, die eigentlich aus dem Kontext analogen Problemlösens stammen, zur Herleitung von Vorhersagen bezüglich der Entstehung von Sequenzeffekten eignen, stützt das integrative Rahmenmodell, dessen Formulierung in großem Ausmaß auf dem aktuellen Kenntnisstand zum analogen Problemlösen beruht.
- Zweitens kann gezeigt werden, dass das bloße Angebot von Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten nicht hinreichend ist,

um einen positiven Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben in einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz zu unterstützen. Damit findet sich keine Unterstützung der Untersuchungshypothese 3.

- Stattdessen liefern die Befunde drittens Evidenz, dass Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben durch die Fähigkeit zur Wahrnehmung von Strukturmerkmalen moderiert werden (Untersuchungshypothese 6): Liegt bereits Wissen bezüglich struktureller Ähnlichkeiten aufeinander folgender Aufgaben vor, dann können Problemlöser in Sinne eines – möglicherweise sogar teilweise automatischen – positiven Transfers von einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz profitieren (Untersuchungshypothesen 2 bzw. 4). Andernfalls bleibt ein Sequenzeffekt zu Gunsten einer solchen Sequenz aus bzw. es lassen sich sogar Vorteile einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz nachweisen, in der strukturell unähnliche Aufgaben nacheinander präsentiert werden (Untersuchungshypothese 5). Die besseren Problemlöseleistungen einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz beruht darauf, dass sie die strukturellen Unterschiede zwischen oberflächlich ähnlichen Aufgaben betont und so vermutlich Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung unterstützt. Gleichzeitig verweist diese Sequenz auf die mangelnde Eignung aufeinander folgender Aufgaben für einen analogen Transfer.
- Viertens ergeben sich zumindest im ersten Experiment Hinweise, dass neben den angesprochenen Transferprozessen auch Lernen bei der Aufgabenbearbeitung eine wichtige Funktion bei der Entstehung von Sequenzeffekten einnimmt. Für die Identifikation von Strukturmerkmalen besonders geeignete, nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenzen fördern scheinbar den Erwerb flexiblen und adaptierbaren Wissens, welches sich für die anschließende Bearbeitung von Transferaufgaben als hilfreich erweist.

Nicht alle Annahmen, auf denen das integrative Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten aufbaut, sind jedoch Gegenstand der bisherigen Untersuchungen gewesen:

- Nicht beantwortet ist erstens die Frage, wie eine Variation der Aufgabenanordnung nach ihrer relativen Komplexität zur Entstehung von Sequenzeffekten beiträgt (Untersuchungshypothese 1).

- Zweitens wurde in den bisherigen Experimenten der Bedeutung struktureller Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben nur bei einer gleichzeitigen *systematischen* Variation der Oberflächenmerkmale nachgegangen. Ungeklärt ist, welche Auswirkungen eine Anordnung zu bearbeitender Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit auf die Entstehung von Sequenzeffekten hat, wenn diese Kreuzvariation der Oberflächen- und Strukturmerkmale der Aufgaben aufgehoben wird, z.B. indem jede Aufgabe eine andere, im Hinblick auf ihre Zugehörigkeit zu einer bestimmten Aufgabenkategorie neutrale semantische Einbettung aufweist.
- Drittens wurden Annahmen zur Förderung von Lernprozessen bei der Aufgabenbearbeitung durch bestimmte Aufgabensequenzen bislang nur implizit bestätigt, indem nachgewiesen werden konnte, dass im Hinblick auf Wissenserwerbsprozesse vermutlich geeignete Bearbeitungssequenzen in besseren Problemlöseleistungen bei der anschließenden Bearbeitung von Transferaufgaben resultieren. Es wäre wünschenswert, weitere Evidenz für diese Annahme zu erhalten, indem z.B. auch andere Maße zur Registrierung des Wissenserwerbs verwendet werden.
- Viertens hat sich zwar bereits in den Untersuchungen zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung multipler Algebraaufgaben gezeigt, dass die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten als entscheidende Voraussetzung für einen analogen Transfer die Entstehung der interessierenden Effekte moderiert (Untersuchungshypothese 6). Auch hier wäre es allerdings wünschenswert, zusätzliche empirische Hinweise für die Bedeutsamkeit dieses Faktors zu erhalten, da dieser eine entscheidende Rolle im integrativen Rahmenmodell einnimmt. Beispielsweise wird dieser Faktor genutzt, um Unterschiede zwischen der Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben auf der Basis automatischer Transferprozesse einerseits und der Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben auf der Basis analoger Transferprozesse andererseits zu erklären. Dies geschieht, indem angenommen wird, dass bei voraussetzungsreichen Aufgaben Problemlöser zunächst durch aufwändige Vergleichs- und Abstraktionsprozesse eine Ähnlichkeitsfeststellung treffen müssen, bevor sie einen Transfer initiieren.

Die angesprochenen vier Punkte bilden den Untersuchungsgegenstand der zweiten Experimentalreihe.

Es ist schwierig, auf der Basis der bisherigen Befunde Aussagen zur Aufgabensequenzierung sowie zu deren Auswirkungen auf die Problemlöseperformanz zu treffen. Die Befunde in Experiment 2 liefern zwar eine erste Bestätigung der Hypothese, dass eine Aufgabensequenzierung vor allem dann mit einer Verbesserung der Bearbeitungsleistung einhergeht, wenn von einer Präsentationssequenz abgewichen wird, die für einen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben ungeeignet ist, da diese Aufgaben unterschiedlichen Aufgabenkategorien angehören (Untersuchungshypothese 12). Diese Befunde stützen somit die Konzeption von Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie, die zur Verbesserung von für einen analogen Transfer ungünstigen Bedingungen eingesetzt werden kann. Darüber hinaus gibt es in Experiment 2 auch Hinweise darauf, dass eine Aufgabensequenzierung auch unabhängig von der Art der vorgegebenen Präsentationssequenz mit besseren Problemlöseleistungen einhergeht. Die Tatsache, dass diese Leistungsverbesserungen unter anderem bei den – von der eigentlichen Aufgabensequenzierung nicht betroffenen – Transferaufgaben zu beobachten ist, deutet darauf hin, dass durch die Aufforderung zur Aufgabensequenzierung möglicherweise eine tiefer gehende Verarbeitung der zu bearbeitenden Aufgaben angestoßen wird, die unter anderem das Erkennen struktureller Aufgabenmerkmale fördert. Leider konnte für diese Interpretation in Experiment 3 keine weitere Evidenz gewonnen werden, da die Häufigkeit, mit der eine Aufgabensequenzierung vorgenommen wurde, so gering ausgeprägt war, dass auf eine Analyse der entsprechenden Daten verzichtet werden musste. Die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung war insgesamt in den vorgestellten Experimenten deutlich niedriger, als man auf der Basis der in Kapitel 5 beschriebenen Fragebogenstudie hätte erwarten können. Trotzdem soll an dieser Stelle die Untersuchungshypothese 8, in der von einer generellen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung ausgegangen wird, nicht verworfen werden.

Mögliche Erklärungen für die relativ geringe Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung in den Experimenten 2 und 3 bestehen darin, dass mit diesem Vorgehen aus der Sicht der Problemlöser einerseits ein nur verhältnismäßig geringer Nutzen und andererseits relativ hohe Kosten verbunden sind. In Kapitel 4 wurde dafür argumentiert, dass die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung im Wesentlichen von dem – aus der Sicht des Problemlösers – mit einer Sequenzierung verbundenen Kosten-

Nutzen Verhältnis abhängen sollte. Der antizipierte Nutzen einer Aufgabensequenzierung sollte vor allem durch die Überzeugung des Problemlösers bestimmt sein, dass die Reihenfolge, in der eine Menge von Aufgaben bearbeitet wird, einen Einfluss auf die Problemlöseleistung hat, so dass Veränderungen in der Bearbeitungssequenz eine Verbesserung der Performanz zur Folge haben können. Die Daten der Fragebogenstudie zeigen deutlich, dass Problemlöser eine Aufgabensequenzierung überwiegend vornehmen würden, um mit der Bearbeitung einfacherer Aufgaben beginnen zu können, während die strukturelle Ähnlichkeit von Aufgaben eine untergeordnete Rolle spielt. Eine Voraussetzung für eine Aufgabensequenzierung ist demnach, dass die Aufgaben durch den Problemlöser als variabel hinsichtlich ihrer Komplexität wahrgenommen werden und dass gleichzeitig unterschiedlich komplexe Aufgaben strukturelle Ähnlichkeiten zueinander aufweisen, damit ein Transfer der Lösung einer einfachen Aufgabe zu einer komplexeren Aufgabe möglich ist. Diese Voraussetzungen sind für die verwendeten Aufgaben möglicherweise nicht gegeben, vor allem weil auf eine systematische Variation der Aufgabenkomplexität (unter Beibehaltung der strukturellen Merkmale der Aufgaben) verzichtet wurde. Die im folgenden Kapitel beschriebene zweite Experimentalserie beinhaltet eine gezielte Manipulation der relativen Komplexität strukturell ähnlicher Aufgaben, so dass dort aus diesem Grund eine größere Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung zu erwarten ist.

Eine Aufgabensequenzierung kann in den bisher beschriebenen Experimenten jedoch nicht nur auf Grund der fehlenden Komplexitätsmanipulation mit einem geringen antizipierten Nutzen verbunden gewesen sein, sondern gleichzeitig mit übermäßig hohen Kosten. Diese Kosten resultieren aus allen zusätzlichen Prozessen, die bei einer Aufgabensequenzierung eingesetzt werden müssen und die bei einem einfachen Beibehalten der Präsentationssequenz für die Bearbeitung der Aufgaben entfallen bzw. weniger aufwändig sind.

Diese Prozesse bestehen darin, dass zunächst alle Aufgaben durchgelesen werden, und dass der Problemlöser prüft, inwieweit eine Aufgabe für eine Nutzung als potenzielles Quell- oder Zielproblem geeignet ist. Hierzu müssen zunächst aber alle Aufgaben im Hinblick auf ihre lösungsrelevanten Merkmale so weit elaboriert werden, dass das Ausmaß struktureller Ähnlichkeiten zwischen einer bereits gelösten Aufgabe und noch zu bearbeitenden Aufgaben abgeschätzt werden kann. Dies bedeutet auch, dass Vergleiche zwischen verschiedenen Aufgaben hinsichtlich ihrer Eignung als potenzielle Quell- oder Zielprobleme durchgeführt werden müssen.

Neben diesen Elaborations- und Vergleichsprozessen kann eine Aufgabensequenzierung mit zusätzlichen Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen verbunden sein, aus denen weitere Kosten resultieren. Steuerungsanforderungen bestehen darin, dass es – je nach Art der Aufgabenpräsentation – unterschiedlich aufwändig sein kann, von der gegebenen Präsentationssequenz der Aufgaben abzuweichen und eine Aufgabe zur Bearbeitung auszuwählen. Ebenso können sich zusätzliche Gedächtnisanforderungen ergeben, da bei einer Aufgabensequenzierung memoriert werden muss, welche Aufgaben bereits bearbeitet wurden und welche Aufgaben noch gelöst werden müssen. Wird dagegen die Präsentationssequenz zur Bearbeitung der Aufgaben beibehalten, besteht die Anforderung an den Problemlöser lediglich darin, sich zu merken, an welcher Position in einer linearen Abfolge von Aufgaben er sich zum aktuellen Zeitpunkt der Aufgabenbearbeitung befindet.

In den Experimentalanordnungen der Experimente 2 und 3 wurden die Aufgaben auf einer Übersichtsseite präsentiert, von der ausgehend ein Problemlöser Aufgaben auswählen konnte. Um allerdings die Aufgabenstellung der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe vor Augen zu haben, musste immer wieder auf die alle Aufgaben enthaltende Übersichtsseite zurückgegriffen werden. Der Problemlöser musste sich dementsprechend merken, welche Aufgabe er gerade bearbeitete und für welche Aufgaben er die Bearbeitung bereits abgeschlossen hatte, ohne dass ihm Unterstützung im Hinblick auf diese Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen durch das Untersuchungssetting gewährt wurde. Ein lineares, der Präsentationssequenz folgendes Vorgehen stellt in diesen Experimentalanordnungen das weniger aufwändige und daher vermutlich bevorzugte Vorgehen dar, auch wenn es sich möglicherweise im Hinblick auf die Problemlöseperformanz als das ungünstigere erweist.

Um die im Abschnitt 4.3 beschriebenen Untersuchungshypothesen zum Sequenzierungsverhalten und zu dessen Auswirkungen auf die Performanz besser untersuchen zu können, wurde für die nachfolgenden Experimente eine computerbasierte Experimentalanordnung verwendet, in der eine Aufgabensequenzierung auf Grund der Art der Materialpräsentation einfacher umsetzbar und daher mit geringeren Kosten verbunden sein sollte als es vermutlich bislang in den papierbasierten Experimenten der Fall war. Insbesondere wurden in der Experimentalanordnung die Aufgabenauswahl sowie vor allem das Memorieren bereits bearbeiteter Aufgaben durch entsprechende technische Realisierungen unterstützt.

Das in der computergestützten Experimentalumgebung realisierbare Sequenzierungsverhalten ist dort nicht nur einfacher umsetzbar und daher mit geringeren Kosten verbunden, sondern wird darüber hinaus durch die besondere Art der Informationszugänglichkeit möglicherweise sogar nahe gelegt. Nonlineare hypertextbasierte Umgebungen wie die verwendete Experimentalumgebung sind gerade durch die Möglichkeit zur Informationssequenzierung und -selektion gekennzeichnet (Conklin, 1987; Rouet, Levonen, Dillon & Spiro, 1996), so dass der über Hyperlinks realisierte Informationszugriff gegenüber papierbasierten Informationspräsentationen einen gewissen Aufforderungscharakter (*affordance*, Gibson, 1979) beinhaltet, eine Aufgabensequenzierung – abweichend von der durch die Präsentationssequenz nahe gelegten Bearbeitungsreihenfolge – vorzunehmen.

Mit der Verwendung dieser computerbasierten Experimentalumgebung ist auch ein Wechsel der Untersuchungsdomäne verbunden, da aus ökonomischen Gründen auf eine bereits bestehende Umgebung zurückgegriffen wurde. Diese Umgebung und die damit durchgeführten Experimente werden im nächsten Kapitel beschrieben.

7. Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung von Textaufgaben aus der Kombinatorik

Die im Folgenden dargestellte Experimentalserie⁵ beschäftigt sich mit der Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung von Textaufgaben aus der Kombinatorik.

- In Experiment 4 wurde zunächst geprüft, inwieweit eine Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität (Untersuchungshypothese 1) und ihrer strukturellen Ähnlichkeit (Untersuchungshypothese 2) zur Entstehung von Sequenzeffekten beiträgt. Zusätzlich wurde den Untersuchungshypothesen 6 und 7 nachgegangen, in denen von einer Moderation der Sequenzeffekte durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen ausgegangen wird. Da den Versuchspersonen die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung gegeben wurde, konnte auch die Hypothese 8 untersucht werden, die von einer generellen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung ausgeht. Dabei wurde analysiert, inwieweit das Sequenzierungsverhalten durch die Qualität der Präsentationssequenz (Untersuchungshypothese 9) und/oder durch das domänenspezifische Vorwissen (Untersuchungshypothese 10) moderiert wird. Schließlich sollte dieses Experiment Evidenz im Hinblick auf die Frage liefern, ob es durch eine Aufgabensequenzierung zu Verbesserungen der Problemlöseperformanz kommt, die durch die Qualität der vorgegebenen Präsentationssequenz (Untersuchungshypothese 12) und/oder durch das domänenspezifische Vorwissen (Untersuchungshypothese 14) beeinflusst werden.
- In Experiment 5 wurde der Frage nachgegangen, ob Sequenzeffekte automatisch aus einer günstigen Anordnung der Aufgaben resultieren (Untersuchungshypothese 2). Die Gegenhypothese lautet, dass die in Experiment 4 nachgewiesenen Sequenzeffekte daraus resultieren, dass das Vorliegen einer Sequenzierungsinstruktion im Sinne einer Maßnahme zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten wirkt und damit entscheidend zur Entstehung der Effekte beiträgt (Untersuchungshypothese 3). Auch in diesem

⁵ Ein Teil der in diesem Kapitel berichteten Befunde wurde publiziert in: Scheiter, K. & Gerjets, P. (2002). The impact of problem order: Sequencing problems as a strategy for improving one's performance. In W. D. Gray & C. D. Schunn (Eds.), *Proceedings of the 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 798-803). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Experiment wurde die moderierende Rolle domänenspezifischen Vorwissens untersucht (Untersuchungshypothesen 6 und 7).

- In Experiment 6 wurde der Frage nachgegangen, ob die Wirkung einer Sequenzierungsinstruktion im Hinblick auf die Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten und damit der Entstehung von Sequenzeffekten spezifisch ist oder ob der gleiche Effekt auch durch eine Instruktion zum Aufgabenvergleich erreicht werden kann. Dieses Experiment orientiert sich an der Untersuchungshypothese 3 und ist darüber hinaus wesentlich durch die Ergebnisse von Experiment 4 und 5 inspiriert.

Bevor diese Experimente dargestellt werden, soll zunächst ähnlich wie für die erste Experimentalserie ein Überblick über die Untersuchungsdomäne gegeben werden, um die experimentelle Manipulation der Aufgabensequenzen anhand der *strukturellen Ähnlichkeit* der Aufgabentypen sowie anhand der *relativen Komplexität* der verwendeten Aufgaben beschreiben zu können.

Bei der Kombinatorik handelt es sich um einen Teilbereich der Wahrscheinlichkeitstheorie, in dem es darum geht, die Anzahl möglicher komplexer Ereignisse als Voraussetzung zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines spezifischen komplexen Ereignisses zu bestimmen. Dieses komplexe Ereignis ist dabei so definiert, dass es sich um eine bestimmte, zufällig getroffene Auswahl oder eine Anordnung einer (Teil-) Menge von Elementen aus einer begrenzten Gesamtmenge von Elementen handelt.

In der Kombinatorik können sechs verschiedene Aufgabenkategorien (Tabelle 20) unterschieden werden, die sich durch die Ausprägungen auf drei binären Merkmalsdimensionen charakterisieren lassen:

- Erstens werden Aufgaben danach unterschieden, ob es sich um eine *Auswahl* einer Teilmenge von Elementen oder um eine *Anordnung* der Gesamtmenge aller Elemente handelt. Variationen und Kombinationen beschreiben Auswahlen, während es sich bei Permutationen um eine vollständige Anordnung aller Elemente handelt.
- Ein zweites Unterscheidungsmerkmal besteht darin, ob die *Reihenfolge* der Auswahl oder Anordnung der Elemente von Bedeutung ist. Während bei Variationen und Permutationen die Reihenfolge der Elemente bedeutsam ist, wird bei Kombinationen die Reihenfolge der ausgewählten Elemente nicht berücksichtigt. Das heißt, das komplexe Ereignis, zuerst eine blaue und anschließend

eine rote Kugel aus einer Urne zu ziehen, wird nicht von dem inversen Ereignis unterschieden, zuerst die rote und dann die blaue Kugel zu ziehen.

- Drittens kann man für Permutationen, Variationen und Kombinationen weiter differenzieren, ob innerhalb einer Auswahl Elemente mehrfach auftreten können bzw. ob eine Anordnung nicht unterscheidbare Elemente enthält oder nicht (*mit* versus *ohne Wiederholung*).

Mit Hilfe der beschriebenen drei binären Merkmale lassen sich insgesamt nur sechs (und nicht acht) verschiedene Aufgabenkategorien unterscheiden, da die Strukturmerkmale nicht vollständig miteinander gekreuzt werden. Bei einer Anordnung der Elemente (im Gegensatz zu Auswahlen) ist immer gleichzeitig eine Reihenfolge der Elemente impliziert. Jede der sechs Aufgabenkategorien ist durch eine Formel gekennzeichnet, mit der sich die Anzahl möglicher Auswahlen und Anordnungen bestimmen lässt.

Tabelle 20: Aufgabenkategorien in der Kombinatorik

Aufgabenkategorie	Beschreibung	Formel
Permutation ohne Wdh.	Anordnung aller n Elemente einer Menge; alle Elemente sind voneinander unterscheidbar	$A = n!$
Permutation mit Wdh.	Anordnung aller n Elemente einer Menge; k Elemente sind nicht voneinander unterscheidbar	$A = \frac{n!}{k!}$
Variation ohne Wdh.	Auswahl von k Elementen aus einer Menge von n Elementen in einer bestimmten Reihenfolge; jedes Element kann nur einmal in der ausgewählten Menge vorkommen	$A = \frac{n!}{(n-k)!}$
Variation mit Wdh.	Auswahl von k Elementen aus einer Menge von n Elementen in einer bestimmten Reihenfolge; Elemente können mehrfach in der ausgewählten Menge vorkommen	$A = n^k$
Kombination ohne Wdh.	Auswahl von k Elementen aus einer Menge von n Elementen ohne eine bestimmte Reihenfolge; jedes Element kann nur einmal in der ausgewählten Menge vorkommen	$A = \frac{n!}{(n-k)!k!}$
Kombination mit Wdh.	Auswahl von k Elementen aus einer Menge von n Elementen ohne eine bestimmte Reihenfolge; Elemente können mehrfach in der ausgewählten Menge vorkommen	$A = \frac{(n+k-1)!}{(n-1)!k!}$

$n!$ steht für n Fakultät und entspricht folgendem mathematischen Ausdruck: $n! = n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 1$. Diese Anzahl möglicher Permutationen von n Elementen bildet ein Basiskonzept in der Kombinatorik, über das sich jede der angegebenen Formeln herleiten lässt. Strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenen Aufgabenkategorien lassen sich daher anhand der Anzahl an Permutationen, die bei der Bearbeitung einer Aufgabe berücksichtigt werden müssen, beschreiben. Diese Ähnlichkeiten werden im Folgenden für die Aufgabenkategorien 'ohne Wiederholung' näher erläutert, da entsprechende Aufgaben als Testaufgaben in den experimentellen Untersuchungen verwendet wurden.

Permutation ohne Wiederholung. Eine Permutation ohne Wiederholung, bei der alle Elemente eines Sets angeordnet werden, entspricht dem Basiskonzept $n!$ Hat man beispielsweise eine Menge von fünf verschiedenfarbigen Kugeln in einer Urne und zieht diese Kugeln eine nach der anderen aus der Urne, so hat man beim ersten Zug fünf Kugeln zur Auswahl, beim zweiten Zug nur noch vier usw.

Variation ohne Wiederholung. Bei einer Variation ohne Wiederholung handelt es sich um eine Auswahl von k Elementen aus einer Mengen von n Elementen in einer bestimmten Reihenfolge, wobei jedes Element nur einmal in der ausgewählten Menge vorkommen kann. Gefragt ist beispielsweise die Anzahl der Möglichkeiten, zwei Kugeln in einer bestimmten Reihenfolge aus der Menge von fünf Kugeln auszuwählen. Zur Beantwortung dieser Frage können wir uns zunächst vorstellen, es würden alle Kugeln der Reihe nach aus der Urne gezogen, so dass eine Anordnung sämtlicher enthaltener Kugeln vorgenommen würde. Es ist nun jedoch ausschließlich von Bedeutung, wie sich die Kugeln auf die ersten beiden Positionen verteilen, während es nicht entscheidend ist, wie die Kugeln auf den Positionen drei bis fünf angeordnet sind. Es gibt fünf Möglichkeiten, die erste Position zu besetzen, während für die Besetzung der zweiten Position nur noch vier Kugeln zur Auswahl stehen. Demnach ergeben sich $5 \cdot 4 = 20$ Möglichkeiten, zwei Kugeln aus fünf Kugeln in einer bestimmten Reihenfolge auszuwählen. Jede dieser 20 Anordnungen könnte theoretisch durch $3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$ Permutationen der übrigen Kugeln fortgesetzt werden.

Bei der Variation ohne Wiederholung geht es folglich darum, die Anzahl der verschiedenen Abfolgen zu bestimmen, die mit der Anordnung einer Teilmenge von k Elementen beginnen. Wie sich diese Abfolgen im Hinblick auf die Anordnung der verbleibenden $(n-k)$ Elemente unterscheiden, wird nicht berücksichtigt. Diese Anzahl kann im Fall überschaubarer Elementemengen noch durch einfaches Auszählen bestimmt werden, für größere Zahlen bietet sich jedoch die Verwendung der entsprechenden Formel an. Im Zähler des Bruchs der Variationsformel wird dabei zunächst die Menge der möglichen Permutationen sämtlicher n Elemente bestimmt. Bezogen auf das Beispiel ergeben sich 120 verschiedene Anordnungsmöglichkeiten der fünf Elemente. Da von diesen jedoch nur die Teilmenge derjenigen Permutationen interessiert, die hinsichtlich der ersten k Elemente unterscheidbar sind, nämlich 20, werden die Permutationen der übrigen $(n-k)$ Elemente im Nenner der Formel herausgerechnet. Jede der 20 interessierenden Abfolgen kann theoretisch mit einer von $(n-k)! = 6$ Permutationen fortgesetzt werden, so dass man in der Summe wieder die 120

Möglichkeiten erhält, die Menge aller Elemente zu permutieren. Die Ähnlichkeit einer Variation zu einer Permutation beruht folglich darauf, dass die Anzahl möglicher Permutationen der ausgewählten k Elemente als Verhältnis zwischen der Anzahl aller möglichen $n!$ Permutationen und der Anzahl möglicher Permutationen der nach der Auswahl verbleibenden $(n-k)$ Elemente dargestellt wird.

Kombination ohne Wiederholung. Bei einer Kombination ohne Wiederholung handelt es sich wie bei der Variation ohne Wiederholung um eine Auswahl von k Elementen aus einer Menge von n Elementen, wobei auch hier jedes Element nur einmal in der ausgewählten Menge vorkommen kann. Im Gegensatz zu Variationen spielt es bei Kombinationen jedoch keine Rolle, in welcher Reihenfolge die k Elemente ausgewählt werden. Bezogen auf das Beispiel der Auswahl von zwei aus fünf Kugeln bedeutet dies, dass es keinen Unterschied macht, ob zuerst die rote und dann die grüne Kugel gezogen wird oder umgekehrt. Anstelle der 20 Möglichkeiten, voneinander unterscheidbare Auswahlen von zwei Kugeln zu treffen, wenn die Reihenfolge der Auswahl wichtig ist (Variation), gibt es im Falle der Kombination nur noch halb so viele Möglichkeiten, da die Binnenpermutation der beiden ausgewählten Elemente nicht zur weiteren Unterscheidung verschiedener Auswahlen beiträgt. Dieser Überlegung wird in der Formel Rechnung getragen, indem aus der Anzahl der möglichen $n!$ Permutationen nicht nur die Anzahl möglicher Permutationen der nicht ausgewählten $(n-k)$ Elemente im Nenner herausgerechnet wird, sondern auch die $k!$ Binnenpermutationen der ausgewählten Elemente. Die Ähnlichkeit einer Kombination zu einer Permutation beruht folglich darauf, die Anzahl möglicher Auswahlen von k Elementen als Verhältnis zwischen der Anzahl aller möglichen $n!$ Permutationen und der Anzahl der $k!$ Binnenpermutationen der ausgewählten Elemente sowie der Anzahl möglicher Permutationen der übrigen $(n-k)$ Elemente darzustellen.

Beschreibung der strukturellen Ähnlichkeit zwischen den drei Aufgabenkategorien. Strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenen Aufgabenkategorien lassen sich auf diese Weise anhand der Anzahl an Permutationen, die bei der Bearbeitung einer Aufgabe berücksichtigt werden müssen, beschreiben. Entsprechend dieser Logik sollten Permutationen und Variationen sowie Variationen und Kombinationen eine höhere Ähnlichkeit aufweisen als Permutationen und Kombinationen. Während sich die Aufgabenkategorien der ersten beiden Paare nämlich nur durch

eine Teilpermutation unterscheiden, weichen Permutationen und Kombinationen in zwei zu berücksichtigenden Permutationen voneinander ab.

Diese Ähnlichkeitsbestimmung wird zusätzlich durch einen Vergleich der definitiven Gemeinsamkeiten und Unterschiede gestützt. Setzt man voraus, dass alle Aufgaben „ohne Wiederholung“ sind, dann entscheiden die Ausprägungen von zwei strukturellen Aufgabenmerkmalen, welcher Aufgabenkategorie eine Aufgabe angehört – erstens die Frage, ob alle Elemente einer Menge berücksichtigt werden oder nur eine Teilmenge und zweitens die Frage, ob die Reihenfolge der Elemente zur Unterscheidung verschiedener Elementemengen von Bedeutung ist. Permutationen sind demnach vollständige Anordnungen von Elementen, die mit Variationen gemeinsam haben, dass die Reihenfolge von Bedeutung ist. Dagegen teilen Variationen und Kombinationen die Tatsache, dass es sich bei beiden Aufgabenkategorien um Auswahlen handelt, wobei nur im Falle von Variationen zusätzlich die Reihenfolge, in der die Elemente ausgewählt werden, entscheidend ist. Permutationen und Kombinationen unterscheiden sich hingegen auf beiden Merkmalsdimensionen und sind sich damit unähnlicher als die anderen beiden Paarlinge. Diese Beziehungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

Basierend auf diesen Überlegungen zur Ähnlichkeit der drei Aufgabenkategorien Permutation, Variation und Kombination (jeweils ohne Wiederholung) und in Einklang mit dem integrativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten wird postuliert, dass eine Aufgabensequenz, bei der die Aufgaben *ihrer strukturellen Ähnlichkeit entsprechend* in der beschriebenen Reihenfolge dargeboten werden (Permutation, Variation, Kombination), zu besseren Leistungen führt als Aufgabenabfolgen, bei denen Permutationen und Kombinationen aufeinander folgen (Untersuchungshypothese 2).

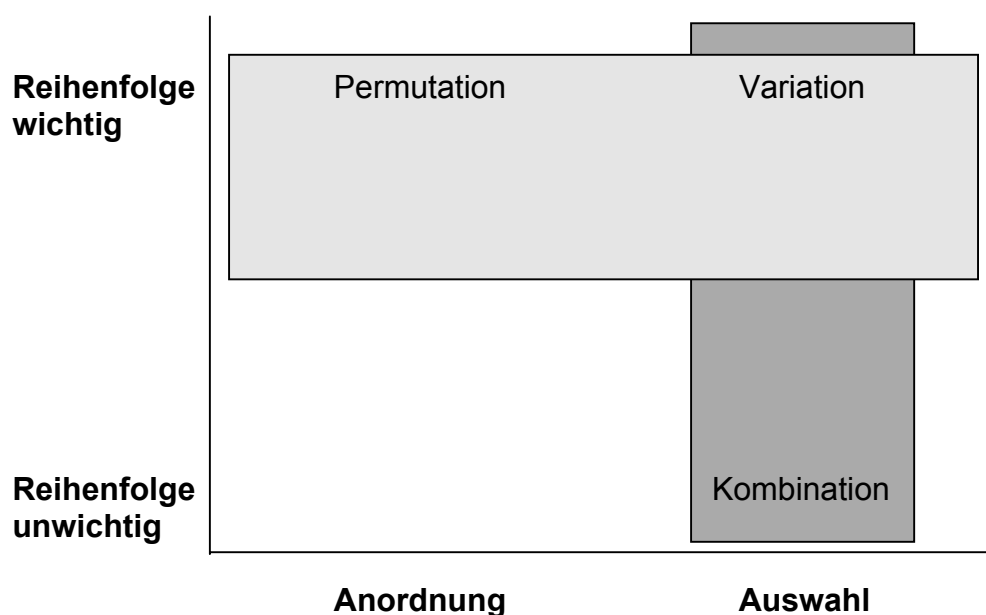


Abbildung 14: Ähnlichkeitsbeziehungen der drei Aufgabenkategorien
Permutation, Variation und Kombination

In den nachfolgenden Experimenten wurde zusätzlich zu dieser Variation der strukturellen Ähnlichkeit aufeinander folgender Aufgabenkategorien auch die *relative Komplexität* der Aufgaben einer Aufgabenkategorie zueinander manipuliert. Entscheidend für die vorgenommene Komplexitätsmanipulation ist es, dass durch sie keine Veränderung der Zugehörigkeit einer Aufgabe zu einer der drei genannten Aufgabenkategorien hervorgerufen wird, so dass zu jeder Aufgabenkategorie einfache und komplexe Aufgaben vorliegen, die durch die gleichen Strukturmerkmale gekennzeichnet sind. Bei einfachen Aufgaben einer Aufgabenkategorie musste jeweils die Wahrscheinlichkeit für einen einzigen Auswahl- oder Anordnungsprozess berechnet werden. Bei komplexen Aufgaben wurden dagegen zwei voneinander unabhängige, da auf unterschiedlichen Gesamtmengen beruhende Auswahl- oder Anordnungsprozesse beschrieben, für die die Wahrscheinlichkeiten zunächst einzeln bestimmt werden mussten. In einem nachfolgenden Schritt mussten diese Wahrscheinlichkeiten dann multiplikativ miteinander verknüpft werden, um die Gesamtwahrscheinlichkeit für das in der Aufgabe gefragte Ereignis zu bestimmen. Die beiden beschriebenen Teilprozesse gehörten dabei immer der gleichen Aufgabenkategorie an. Die diesem Verfahren entsprechend konstruierten einfachen und komplexen Testaufgaben für jede Aufgabenkategorie finden sich in Tabelle 21.

Tabelle 21: Einfache und komplexe Testaufgaben für die Aufgabenkategorien
Permutation, Variation und Kombination (jeweils ohne Wiederholung)

Permutation ohne Wiederholung – einfache Aufgabe:

Bei einem Kreativitätstest, der von einer Gruppe von drei Wissenschaftlern entwickelt wurde, müssen die Probanden für acht Abbildungen von sozialen Situationen eine Reihenfolge bestimmen, zu der sie im Anschluss eine Geschichte erzählen sollen. Wie viele Möglichkeiten gibt es, die Bilder anzuordnen?

Permutation ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe:

Die Inhaberin des Modegeschäfts Mode 23 entscheidet sich, ihre vier Schaufenster mit neu eingetroffenen Seidenschals zu dekorieren. Für das Schmücken der Fenster stehen ihr ein roter, ein gelber, ein oranger, ein grüner, ein blauer und ein violetter Schal zur Verfügung. Da sie sich nicht für eine bestimmte Anordnung der Tücher entscheiden kann, beschließt sie, die Gestaltung der Fenster dem Zufall zu überlassen und hängt die Schals in der Reihenfolge auf, in der sie sie aus dem Versandkarton zieht. Wie viele Möglichkeiten hat sie, alle Tücher so anzuordnen, dass das rote, das orange und das gelbe Tuch in beliebiger Reihenfolge jeweils nebeneinander hängen?

Variation ohne Wiederholung – einfache Aufgabe:

Ein Leuchtturm hat sechs verschiedenfarbige Farbtöne zur Verfügung (rot, gelb, grün, blau, orange, pink), aus denen jeweils zufällig die für ein Signal verwendeten Farben ausgewählt werden. Jedes Signal besteht aus zwei aufeinander folgenden Farbzeichen, wobei niemals die gleichen Farben hintereinander gesendet werden. Wie bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit, dass der Leuchtturm ein rot-oranges Signal abgibt, d.h. zuerst rot strahlt und anschließend orange?

Variation ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe:

Bei einem Fußballspiel stehen den beiden Mannschaften zwei Umkleidekabinen zur Verfügung. Da der Gang von den Kabinen auf das Spielfeld sehr eng ist, betreten die Spieler der beiden Teams jeweils abwechselnd den Platz. Die Spieler des FC Weißrot tragen die ungeraden Nummern 1 bis 21, die Spieler des FC Waldesruh die geraden Nummern 2 bis 22. Zuerst verlässt ein Spieler des FC Weißrot die Kabine, dann ein Spieler des FC Waldesruh. Wie bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei den ersten fünf Spielern um die Spieler mit den Nummern fünf, zwei, dreizehn, acht und eins in dieser Reihenfolge handelt?

Kombination ohne Wiederholung – einfache Aufgabe:

Ein Kind ist mit seiner Mutter im Supermarkt, um für den am nächsten Tag stattfindenden Schulausflug in die Heide Verpflegung einzukaufen. Es darf aus zehn seiner Lieblingssüßigkeiten drei unterschiedliche Dinge auswählen, die die Mutter anschließend kauft. Zwischen wie vielen möglichen Zusammenstellungen muss sich das Kind entscheiden?

Kombination ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe:

In einem Karnevalsverein, der sich aus neun Frauen und elf Männern zusammensetzt, soll ein Festausschuss aus zwei Frauen und drei Männern gewählt werden. Diese sollen den jährlich stattfindenden Königsumzug organisieren, zu dem sich bereits acht der zwanzig Mitglieder des Vereins angemeldet haben. Wie viele verschiedene Festausschüsse sind möglich?

Gemäß der im integrativen Rahmenmodell explizierten Annahmen sollte eine Aufgabensequenz, bei der zunächst *einfache Aufgaben* gefolgt von *komplexeren Aufgaben*

der gleichen Aufgabenkategorie bearbeitet werden, zu besseren Leistungen führen als eine umgekehrte Abfolge der Aufgaben (Untersuchungshypothese 1).

Im Gegensatz zu der in Kapitel 6 berichteten Experimentalreihe wurde keine systematische Variation der Oberflächenmerkmale vorgenommen, da hier die Rolle struktureller Ähnlichkeit sowie relativer Komplexität unabhängig von der semantischen Einbettung der Aufgaben für die Entstehung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten von primärem Interesse war. Die verwendeten Kombinatorik-Testaufgaben weisen aus diesem Grund jeweils deutlich voneinander unterscheidbare semantische Einbettungen auf.

Unter anderem aus untersuchungsökonomischen Gründen wurde eine der beiden Sequenzprinzipien – Anordnung nach struktureller Ähnlichkeit der Aufgabenkategorien sowie innerhalb jeder Aufgabenkategorie Anordnung der Aufgaben nach zunehmender Komplexität vorgenommen. Diese führte zu folgender Aufgabensequenz, die im Folgenden als *günstige Sequenz* bezeichnet wird:

1. Permutation ohne Wiederholung – einfache Aufgabe
2. Permutation ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe
3. Variation ohne Wiederholung – einfache Aufgabe
4. Variation ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe
5. Kombination ohne Wiederholung – einfache Aufgabe
6. Kombination ohne Wiederholung – komplexe Aufgabe

Diese günstige Sequenz wurde in den drei nachfolgend beschriebenen Experimenten einer ungünstigen Sequenz gegenüber gestellt, die mit der Präsentation der Kombinationsaufgaben begann, anschließend folgten die Permutationsaufgaben, und am Ende wurden die Variationsaufgaben dargeboten. Innerhalb der drei Aufgabenkategorien wurden die Aufgaben in absteigender Komplexitätsabfolge (d.h. komplex-einfach) präsentiert.

7.1 Experiment 4: Sequenz- und Sequenzierungseffekte bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben in frei wählbaren Reihenfolgen

In Experiment 4 wurde mehreren Fragestellungen nachgegangen: Erstens sollte untersucht werden, inwieweit die Vorgabe verschiedener Aufgabensequenzen mit un-

terschiedlichen Problemlöseleistungen verbunden ist. Erwartet wurde, dass die oben beschriebene günstige Sequenz zu einer besseren Problemlöseperformanz sowie zu einem größeren Wissenserwerb führt als die dargestellte ungünstige Aufgabensequenz (Untersuchungshypothesen 1 und 2). Des Weiteren wurde von einer Moderation dieses Sequenzeffekts durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen ausgegangen, wobei keine Entscheidung bezüglich der Art dieser Interaktion getroffen wurde. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, kann einerseits dafür argumentiert werden, dass insbesondere Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen von einer günstigen Präsentationssequenz der Aufgaben profitieren sollten, während möglicherweise Versuchspersonen mit hohem Vorwissen ungünstige Präsentationssequenzen durch Einsatz geeigneter Strategien kompensieren können (Untersuchungshypothese 7). Andererseits verfügen gerade letztere eher über die notwendigen Fähigkeiten zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben in der günstigen Präsentationssequenz und sollten daher in der Lage sein, die dort verfügbaren Lern- und Transfermöglichkeiten – als Voraussetzung für Sequenzeffekte – optimal zu nutzen (Untersuchungshypothese 6).

Um darüber hinaus untersuchen zu können, ob Versuchspersonen die Gelegenheit zur Aufgabensequenzierung wahrnehmen (Untersuchungshypothese 8), erhielten sie die Möglichkeit, die in vordefinierten Reihenfolgen präsentierten Aufgaben in einer beliebigen Sequenz zu bearbeiten. Die Häufigkeit, mit der von der Präsentationssequenz abgewichen wurde (Aufgabensequenzierung), sollte dabei sowohl von der Qualität der vorgegebenen Aufgabenabfolge als auch vom Vorwissen der Versuchspersonen abhängen: Versuchspersonen sollten häufiger von einer ungünstigen Präsentationssequenz abweichen als von der günstigen Präsentationssequenz (Untersuchungshypothese 9), und diese Adaptivität des Sequenzierungsverhaltens sollte vor allem für Versuchspersonen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen nachweisbar sein (Untersuchungshypothese 10).

In ähnlicher Weise wurde erwartet, dass auch der Einfluss der Aufgabensequenzierung auf die Problemlöseperformanz sowohl durch die Qualität der vorgegebenen Aufgabenabfolge als auch durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen moderiert wird: Ein Abweichen von der Präsentationssequenz sollte nur im Fall der Vorgabe einer ungünstigen Aufgabenabfolge mit einer besseren Leistung einhergehen – im Vergleich zu der Leistung, die beim Beibehalten der ungünstigen Sequenz resultiert. Wird hingegen von der günstigen Präsentationsreihenfolge ab-

gewichen, ist nicht mit Leistungsverbesserungen zu rechnen (Untersuchungshypothese 12). Leistungsförderliche Effekte der Sequenzierung sollten sich weiterhin insbesondere für Versuchspersonen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen nachweisen lassen (Untersuchungshypothese 14). Hohes Vorwissen bildet die Voraussetzung, strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben zu erkennen und auf deren Grundlage eine günstige Sequenz der Aufgaben festzulegen.

Method

Versuchspersonen. Bei den untersuchten Versuchspersonen handelte es sich um 80 Studierende verschiedener Fachbereiche der Georg-August-Universität Göttingen mit Deutsch als Muttersprache. Der Datensatz einer Versuchsperson wurde für die statistische Analyse ausgeschlossen, da diese sich während der Lernphase nicht instruktionsgemäß verhalten hatte, indem sie keines der angebotenen Lernbeispiele abgerufen hatte. Die verbleibenden 79 Versuchspersonen (51 weiblich, 28 männlich) waren im Alter von 18 bis 35 Jahren (Durchschnittsalter: 23,2 Jahre). Die Teilnahme an der Untersuchung erfolgte freiwillig. Die Versuchspersonen erhielten entweder ein bis zwei Versuchspersonenstunden (für Studierende der Psychologie) oder eine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme an dem Experiment.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. Alle drei Experimente zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten in der Kombinatorik wurden unter Verwendung einer Version der computerbasierten Lern- und Problemlöseumgebung HYPERCOMB (Gerjets, Scheiter & Tack, 2000; 2002; Scheiter, Gerjets & Albers, 2002; Scheiter, Gerjets & Heise, 2000) durchgeführt, die im Folgenden beschrieben wird. Bei HYPERCOMB handelt es sich um eine Hypertext-Umgebung, deren einzelne Informationsseiten durch das Anklicken so genannter Hyperlinks auf den Bildschirm aufgerufen werden können. Der Vorteil dieser computerbasierten Experimentaldurchführung liegt in der Möglichkeit, die Abrufhäufigkeit einzelner Informationsseiten, die Verweildauer auf diesen Seiten sowie die Reihenfolge, in der auf Informationen zugegriffen wird, mithilfe eines vom Server angelegten Benutzerprotokolls (*logfile*) genau registrieren zu lassen, ohne dass die Versuchsperson durch die Datenerhebung beeinflusst wird (Barab, Bowdish, Young & Owen, 1997). Damit kann unter anderem auch einem Problem der papierbasierten Durchführung der Experiment 1 bis 3 begegnet werden,

welches darin bestand, dass Versuchspersonen häufig vergessen hatten, die Zeiten für die Bearbeitung der Testaufgaben zu notieren.

Die für die aktuellen Experimente verwendete Version von HYPERCOMB präsentierte nach Aufruf der angegebenen URL eine Übersichtsseite, auf der die jeweilige Versuchsbedingung durch Anklicken eines Hyperlinks aufgerufen werden konnte. Im Anschluss erschien eine Seite, auf der persönliche Angaben zu der jeweiligen Versuchsperson eingetragen werden mussten (Alter, Geschlecht, Semester, Studienfach, Mathenote im Abitur, Vorkenntnisse in Kombinatorik). Das Aufrufen dieser Seite führte gleichzeitig zum Ausführen eines serverseitigen Skripts, das automatisch eine Versuchsnummer für den Versuchsdurchgang generierte und so eine anonymisierte Versuchsdurchführung gewährleistete. Ein weiteres Skript wurde verwendet, um sämtliche Daten einer Versuchsperson (Antworteingaben und Zeitdaten) abzuspeichern und zu verwalten.

Das eigentliche Experiment begann mit der Bearbeitung eines Fragebogens zur Erfassung des Vorwissens im Bereich der Kombinatorik. Mit Hilfe dieses neun Items umfassenden Vorwissenstests wurde im Wesentlichen konzeptuelles Wissen zu Begriffen aus der Kombinatorik abgefragt. Ein leicht abgeänderter Test mit zwölf Items wurde am Ende des Experiments eingesetzt, um etwaige Veränderungen im Wissensbestand der Versuchspersonen zu erfassen. Die für den Vorwissens- und den Wissenstest verwendeten Items sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Fragebogenitems zur Erfassung des konzeptuellen Wissens vor und nach der Versuchsdurchführung

-
1. Haben Sie jemals etwas zum Thema Kombinatorik gelesen oder gehört?
 - (a) Ja, in der Schule
 - (b) Ja, im Studium
 - (c) Nein, niemals
 2. Worum geht es in der Kombinatorik?
 - (a) Um die Kombination von Zahlen zu größeren Zahlen
 - (b) *Um die Anzahl möglicher Anordnungen und Auswahlen von Elementen*
 - (c) Um die Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten
 3. Was sind Variationen?
 - (a) Mögliche Anordnungen aller gegebenen Elemente in einer bestimmten Reihenfolge
 - (b) Mögliche Abweichungen von einer vorgegebenen Reihenfolge von Elementen
 - (c) *Mögliche Auswahlen aus gegebenen Elementen in einer bestimmten Reihenfolge*
 4. Was sind Permutationen?
 - (a) Mögliche Auswahlen aus gegebenen Elementen in einer bestimmten Reihenfolge
 - (b) *Mögliche Anordnungen aller gegebenen Elemente in einer bestimmten Reihenfolge*
 - (c) Mögliche Abweichungen von einer vorgegebenen Reihenfolge von Elementen
 5. Was ist $n!$?
 - (a) $n * (n-1) * (n-2) * \dots * 2 * 1$
 - (b) $n + (n-1) + (n-2) + \dots + 2 + 1$
 - (c) $n * (n+1) * (n+2) * \dots * (n+n)$
 6. Was unterscheidet Permutationen von Variationen?
 - (a) *Die Frage, ob eine Gesamtmenge oder eine Teilmenge angeordnet wird*
 - (b) Die Relevanz der Reihenfolge von Elementen
 - (c) Die Möglichkeit wiederholt auftretender Elemente
 7. Was sind Kombinationen?
 - (a) Mögliche Auswahlen von Elementen in einer bestimmten Reihenfolge
 - (b) Mögliche Anordnungen von Elementen in einer bestimmten Reihenfolge
 - (c) *Mögliche Auswahlen von Elementen ohne bestimmte Reihenfolge*
 8. Wenn bei einem Experiment 8 verschiedene Ergebnisse auftreten können und es keine Gründe dafür gibt, dass eines der Ereignisse häufiger auftritt als ein anderes, wie groß ist dann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Ergebnisses?
 - (a) $1/(8!)$
 - (b) $1/8$
 - (c) $1 - 1/7$
 9. Wenn man bei einem Eisverkäufer mit drei Sorten Eis im Angebot eine Waffel mit zwei Eiskugeln kauft, wie viele Möglichkeiten gibt es dann, zwei verschiedene Eiskugeln zu erhalten?
 - (a) *3 Möglichkeiten*
 - (b) 4 Möglichkeiten
 - (c) 6 Möglichkeiten
 10. Was unterscheidet Kombinationen von Variationen?
 - (a) *Die Frage, ob es sich um eine Auswahl oder Anordnung handelt*
 - (b) Die Relevanz der Reihenfolge von Elementen
 - (c) Die Möglichkeit wiederholt auftretender Elemente
-

Tabelle 22: Fragebogenitems zur Erfassung des konzeptuellen Wissens vor und nach der Versuchsdurchführung (Fortsetzung)

-
-
11. Was bedeutet "mit Wiederholung"?
- (a) *Dass in einer Auswahl oder Anordnung Elemente mehrfach vorkommen können*
 - (b) Dass in einem Zufallsexperiment wiederholt Elemente ausgewählt werden
 - (c) Dass Elemente zweimal in der gleichen Reihenfolge ausgewählt werden
12. Wofür steht die Variable "n"?
- (a) Anzahl sich wiederholender Elemente
 - (b) Anzahl auszuwählender Elemente
 - (c) *Anzahl von anzuordnenden Elementen oder von Elementen, aus denen eine Auswahl getroffen wird*
13. Wofür steht die Variable "k" ?
- (a) *Anzahl sich wiederholender Elemente oder Anzahl auszuwählender Elemente*
 - (b) Anzahl von Kombinationen
 - (c) Anzahl von anzuordnenden Elementen oder von Elementen, aus denen eine Auswahl getroffen wird
-
-

Anmerkungen: Bei Frage 1 handelte es sich um eine nur im Vorwissenstest vorkommende Kontrollfrage, die bei der Bestimmung des Vorwissens nicht mit ausgewertet wurde. Die Fragen 2 bis 9 kamen sowohl im Vorwissenstest als auch im Wissenstest nach Abschluss der Untersuchung vor, während die Fragen 10 bis 13 nur im Wissenstest eingesetzt wurden (*korrekte Antworten kursiv*).

An den Vorwissenstest schloss sich eine lineare Abfolge mehrerer Versuchsinstruktionsseiten an, in denen die Versuchsperson darüber informiert wurde, dass es sich bei der verwendeten Lern- und Problemlöseumgebung um einen Hypertext handelt, in dem Informationen durch das Anklicken von Hyperlinks abgerufen werden können. Die Funktionsweise und das Aussehen solcher Hyperlinks wurden kurz erläutert. Des Weiteren wurde ein Überblick über den Ablauf des Experiments dargeboten, das sich aus einer Lernphase, in der anhand von ausgearbeiteten Beispielen Wissen über sechs Aufgabenkategorien aus der Kombinatorik erworben werden konnte, und einer anschließenden Klausurphase zusammensetzte.

Die Versuchspersonen wurden darüber in Kenntnis gesetzt, dass sie während der Klausur nicht auf Informationen aus der Lernphase zurückgreifen könnten, und dass die Klausur aus sechs Aufgaben bestünde, für deren Lösung keine Berechnungen angestellt werden müssten. In Experiment 1 wurde den Versuchspersonen weiterhin mitgeteilt, dass diese sechs Aufgaben in einer frei wählbaren Reihenfolge bearbeitet

werden könnten. Für die Lösung der Aufgaben war das Ausfüllen eines relativ komplexen Lösungsformulars erforderlich, dessen Verwendung mit den Versuchspersonen im Instruktionsteil eingeübt wurde. Abbildung 15 zeigt einen Screenshot des Eingabeformulars.

Netscape: Kombinatorik – Lernumgebung

Eingabe der Beispiellösung

Bitte geben Sie den richtigen Aufgabentyp ein, indem Sie den entsprechenden hellen Kreis anklicken!

Aufgabentyp	Permutation	Kombination	Variation
Standardfälle ohne Wiederholung	<input type="radio"/> $A = n!$	<input type="radio"/> $A = \frac{n!}{(n-k)! k!}$	<input type="radio"/> $A = \frac{n!}{(n-k)!}$
Standardfälle mit Wiederholung	<input type="radio"/> $A = \frac{n!}{k!}$	<input type="radio"/> $A = \frac{(n+k-1)!}{(n-1)! k!}$	<input type="radio"/> $A = n^k$
Spezialfälle ohne Wiederholung*	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$
Spezialfälle mit Wiederholung*	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$	<input type="radio"/> $A = A_1 \times A_2$

*Die Anzahl möglicher Anordnungen oder Auswahlen ergibt sich für die **Spezialfälle** nach dem Prinzip $A = A_1 \cdot A_2$. Handelt es sich beispielsweise bei der Aufgabe um einen **Spezialfall der Variation mit Wiederholung**, so berechnet sich die Anzahl **A** wie folgt:

$$A = n_1 k_1 \cdot n_2 k_2$$

Diese Berechnungsvorschrift muß auch bei der Zuweisung der entsprechenden Werte zu den Variablen berücksichtigt werden. D.h. n_1 und k_1 werden zur Berechnung von A_1 benötigt, n_2 und k_2 dagegen zur Bestimmung von A_2 .

Handelt es sich bei der Aufgabe um einen **Standardfall**, so müssen die entsprechenden Variablenwerte für n_1 und k_1 ausgewählt werden. Zusätzlich muß markiert werden, daß n_2 und k_2 nicht benötigt werden.

Welche Werte nehmen die Variablen **n** und **k** an? Setzen Sie vier Markierungen!

Variable n_1 :	<input type="radio"/> n_1 wird nicht benötigt	<input type="radio"/> $n_1 = 8$	<input type="radio"/> $n_1 = 2$	<input type="radio"/> $n_1 = 13$	<input type="radio"/> $n_1 = 10$
Variable n_2 :	<input type="radio"/> n_2 wird nicht benötigt	<input type="radio"/> $n_2 = 10$	<input type="radio"/> $n_2 = 13$	<input type="radio"/> $n_2 = 8$	<input type="radio"/> $n_2 = 2$
Variable k_1 :	<input type="radio"/> k_1 wird nicht benötigt	<input type="radio"/> $k_1 = 8$	<input type="radio"/> $k_1 = 2$	<input type="radio"/> $k_1 = 13$	<input type="radio"/> $k_1 = 10$
Variable k_2 :	<input type="radio"/> k_2 wird nicht benötigt	<input type="radio"/> $k_2 = 10$	<input type="radio"/> $k_2 = 13$	<input type="radio"/> $k_2 = 8$	<input type="radio"/> $k_2 = 2$

Klicken Sie jetzt bitte unbedingt auf das Absendefeld!

Lösung absenden Bitte unbedingt hier klicken!

Standardfall

Variation ohne Wiederholung

$n_1 = 8$

$k_1 = 2$

n_2 wird nicht benötigt

k_2 wird nicht benötigt

Abbildung 15: Lösungsformular zur Eingabe der Antworten für die Testaufgaben (Übungsseite)

Für diese Übung wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, sie sollten sich vorstellen, eine ihnen bislang unbekannte Aufgabe sei vom Typ 'Variation ohne Wiederholung' und die in dieser Aufgabe für die Variablen einzusetzenden Werte seien $n_1 = 8$, $n_2 =$ 'nicht benötigt', $k_1 = 2$ und $k_2 =$ 'nicht benötigt'. Die Aufgabenkategorie, die in dem Formular durch die zugehörige Formel repräsentiert wurde, und die angegebenen Variablenwerte sollten in einem Multiple Choice-Formular unter 12 Alternativen (für das Lösungsprinzip) bzw. unter jeweils fünf Alternativen (für jeden der Variablenwerte) ausgewählt werden. Weder die Bedeutung der verschiedenen Formeln bzw. Aufgabenkategorien noch die der Variablen wurden den Versuchspersonen zu diesem

Zeitpunkt erklärt. Die Übung diente nur dazu, den richtigen Umgang mit dem Lösungsformular sicherzustellen und den Versuchspersonen zu verdeutlichen, dass es nicht darauf ankäme, Lösungsformeln während der Lernphase auswendig zu lernen, da diese im Lösungsformular angegeben waren. Hatte die Versuchsperson alle Angaben richtig ausgewählt, wurde sie aufgefordert, die Daten durch Anklicken eines entsprechenden 'Sende'-Buttons zu verschicken. Bei einer falschen Antwort erhielt die Versuchsperson so lange korrekatives Feedback, bis sie die richtige Antwort angegeben hatte.

Nach Beendigung dieser Übung begann die eigentliche Lernphase mit einem allgemeinen Einführungsteil in die Domäne Kombinatorik. Dort wurde erläutert, dass es in der Kombinatorik darum ginge, die Anzahl möglicher Auswahlen und Anordnungen für eine Menge von Elementen zu bestimmen, um daraus die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Auswahl oder Anordnung zu berechnen. In der Lernphase wurden sechs Aufgabenkategorien unterschieden: Permutation, Variation und Kombination jeweils mit und ohne Wiederholung.

Für diese Aufgabenkategorien wurden jeweils abstrakte Information über die strukturellen Aufgabenmerkmale, über die mit der Aufgabenkategorie assoziierte Formel sowie über die Bedeutung der in dieser Formel enthaltenden Variablen n und k dargeboten. Darüber hinaus wurden zwei ausgearbeitete Beispielaufgaben zur Veranschaulichung eingesetzt. Eines der Beispiele illustrierte eine einfache Aufgabe der jeweiligen Aufgabenkategorie (einen so genannten Standardfall), zu deren Lösung die mit der Aufgabenkategorie assoziierte Formel nur einmal mit den passenden Ausprägungen der Variablenwerte n und k instantiiert werden musste. Das zweite Beispiel jeder Aufgabenkategorie illustrierte dagegen eine komplexe Aufgabe (einen so genannten Spezialfall), für deren Lösung die mit der Aufgabenkategorie assoziierte Formel zunächst zweifach instantiiert werden musste, um dann zur Bestimmung des Endergebnisses die resultierenden Einzelergebnisse miteinander zu multiplizieren. Während bei Standardfällen also nach der Wahrscheinlichkeit für *eine* bestimmte Auswahl oder Anordnung von Elementen gefragt wurde, bezogen sich Spezialfälle auf die Wahrscheinlichkeit für eine Kombination einer Auswahl oder Anordnung einer Menge von Elementen mit einer weiteren Auswahl oder Anordnung einer zweiten Elementemenge. Bei Standardfällen handelte es sich daher um Aufgabenstellungen, wie sie auch in den später zu bearbeitenden einfachen Testaufgaben beschrieben wurden, während Spezialfälle den komplexen Testaufgaben entsprachen (vgl. Tabel-

le 21). In Abbildung 16 ist jeweils ein Beispiel für einen Standardfall und für einen Spezialfall als Screenshot wiedergegeben.

The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: Kombinatorik - Lernumgebung". The main content area is titled "Kombination ohne Wiederholung: Ein einfaches Alltagsbeispiel". A yellow box contains the question: "Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit beim Lottospielen sechs Richtige zu tippen (6 aus 49)?" Below this, a list of four bullet points explains the problem and provides the solution. On the left side, there is a navigation menu with buttons for "Permutation ohne Wdh.", "Permutation mit Wdh.", "Variation ohne Wdh.", "Variation mit Wdh.", "Kombination ohne Wdh.", "Kombination mit Wdh.", and "Klausur".

**Kombination ohne Wiederholung:
Ein einfaches Alltagsbeispiel**

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit beim Lottospielen sechs Richtige zu tippen (6 aus 49)?

- In der geschilderten Beispielaufgabe geht es um eine Auswahl aus einer Menge von 49 Zahlen. Dies ist die Menge, aus der ausgewählt wird ($n = 49$).
- Es ist die Wahrscheinlichkeit gefragt, aus dieser Menge zufällig die 6 richtigen Zahlen auszuwählen, wobei es irrelevant ist, in welcher Reihenfolge die sechs Zahlen ausgewählt werden. Die Anzahl ausgewählter Elemente beträgt also $k = 6$.
- Setzt man diese Zahlen in die Formel für Kombination ohne Wiederholung ein, also $A = n! / (n-k)! k!$, so ergeben sich $49! / (49-6)! 6! = 13983816$ Kombinationen.
- Die Wahrscheinlichkeit für eine dieser Möglichkeiten (nämlich die 6 richtigen Zahlen auszuwählen) beträgt demnach $1/13983816 = 0.0000072\%$.

The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: Kombinatorik - Lernumgebung". The main content area is titled "Kombination ohne Wiederholung: Ein Beispiel für einen Spezialfall". A yellow box contains the question: "Zwei Freundinnen gehen zusammen in der Supermarkt, um Zutaten für einen Salat einzukaufen. Sie haben die Wahl zwischen 11 verschiedenen Salatsorten sowie zwischen 8 unterschiedlichen Kräutern für das Dressing. Sie wählen 6 Salate sowie 5 Kräuter per Zufall aus. Wie viele verschiedene Salate lassen sich auf diese Weise zusammenstellen, und was ist die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Salat?" Below this, a list of five bullet points explains the problem and provides the solution. On the left side, there is a navigation menu with buttons for "Permutation ohne Wdh.", "Permutation mit Wdh.", "Variation ohne Wdh.", "Variation mit Wdh.", "Kombination ohne Wdh.", "Kombination mit Wdh.", and "Klausur".

**Kombination ohne Wiederholung:
Ein Beispiel für einen Spezialfall**

Zwei Freundinnen gehen zusammen in der Supermarkt, um Zutaten für einen Salat einzukaufen. Sie haben die Wahl zwischen 11 verschiedenen Salatsorten sowie zwischen 8 unterschiedlichen Kräutern für das Dressing. Sie wählen 6 Salate sowie 5 Kräuter per Zufall aus. Wie viele verschiedene Salate lassen sich auf diese Weise zusammenstellen, und was ist die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Salat?

- Um dieses Problem zu lösen, geht man zunächst davon aus, daß es sich um zwei voneinander unabhängige Auswahlen aus zwei Mengen von Objekten handelt, bei denen jeweils die Reihenfolge der Auswahl irrelevant ist. Die Ergebnisse dieser beiden Auswahlen können dann beliebig miteinander kombiniert werden.
- In der geschilderten Beispielaufgabe geht es um zwei voneinander unabhängige Auswahlen aus einer Menge von Salatsorten einerseits und aus einer Menge von Kräuterarten andererseits. Dies sind die Mengen, aus denen ausgewählt wird ($n_1 = 11$ und $n_2 = 8$).
- Um die Anzahl möglicher Salat-/Kräuterzusammenstellungen zu bestimmen, muß zuvor ermittelt werden, wie viele Möglichkeiten es gibt, 6 Salatsorten bzw. 5 Kräuter auszuwählen. Dabei ist die Reihenfolge der Auswahl irrelevant. Die Anzahl ausgewählter Elemente beträgt also $k_1 = 6$ und $k_2 = 5$.
- Setzt man diese Zahlen in die Formel für Kombination ohne Wiederholung ein, also $A = n! / (n-k)! k!$, so ergeben sich $11! / (11-6)! 6! = 462$ Kombinationen für die Salate sowie $8! / (8-5)! 5! = 56$ Kombinationen für die Kräuter.
- Da jede Auswahl der Salate mit jeder Auswahl der Kräuter kombiniert werden kann, ergeben sich $462 \cdot 56 = 25.872$ Möglichkeiten, die Zutaten zusammenzustellen.
- Die Wahrscheinlichkeit für eine dieser Möglichkeiten beträgt demnach $1/25.872 = 0,0039\%$.

Abbildung 16: Ausgearbeitete Beispielaufgaben (Standardfall und Spezialfall)

Die sechs Aufgabenkategorien konnten über eine Navigationsliste am linken Bildschirmrand abgerufen werden. Die Auswahl einer Aufgabenkategorie führte zunächst

240

zur Darstellung einer Seite mit abstrakter Information. Von dieser Seite verwiesen zwei Links auf die – als Standard- und Spezialfall gekennzeichneten – illustrierenden Beispiele. In der Lernphase konnten die Versuchspersonen die Reihenfolge und die Verweildauer für den Informationsabruf selbst bestimmen. Wenn sie den Eindruck hatten, sich hinreichend über die Domäne informiert zu haben, konnten sie durch Anklicken eines entsprechenden Buttons in der Navigationsleiste in die Klausurphase überwechseln. Die Lernphase war für alle Experimente und die darin realisierten experimentellen Bedingungen identisch.

In der Klausurphase mussten sechs Klausuraufgaben bearbeitet werden, wobei es sich um zwei Permutationsaufgaben, zwei Variationsaufgaben und zwei Kombinationsaufgaben handelte. Die Aufgaben waren alle vom Typ 'ohne Wiederholung'. Für jede Aufgabenkategorie wurden jeweils eine einfache und eine komplexe Aufgabe dargeboten (vgl. Tabelle 21). Für die Lösung der sechs Klausuraufgaben mussten keinerlei Berechnungen durchgeführt werden. Stattdessen mussten in dem bereits eingeführten *multiple choice*-Lösungsformular das richtige Lösungsprinzip sowie die korrekten Variablenwerte zur Instantiierung der Formel ausgewählt werden. Für die Bestimmung des Lösungsprinzips war anzugeben, um welche der sechs Aufgabenkategorien (repräsentiert durch die entsprechende Formel) es sich handelte und ob die Aufgabe einen Standardfall oder einen Spezialfall der jeweiligen Aufgabenkategorie darstellte. Zusätzlich zur Bestimmung des Lösungsprinzips mussten die Werte für die vier Variablen n_1 , n_2 , k_1 und k_2 aus jeweils fünf Antwortmöglichkeiten ausgewählt werden. Die Antwortmöglichkeiten bestanden aus dem korrekten Variablenwert, der Angabe, dass die entsprechende Variable nicht benötigt wird sowie drei numerischen Distraktoren. Bei den Standardfällen der drei Aufgabenkategorien musste jeweils berücksichtigt werden, dass die Variablen n_2 und k_2 nicht benötigt werden, da sie lediglich bei einer zweifachen Instantiierung der Lösungsformel notwendig waren (d.h. bei komplexen Aufgaben).

Um zu gewährleisten, dass die Versuchspersonen die sechs Aufgaben einerseits in einer vorgegebenen Reihenfolge präsentiert bekamen, sie aber andererseits von dieser Präsentationsreihenfolge abweichen konnten, wurde die Aufgabenpräsentation wie folgt realisiert: Beendete die Versuchsperson die Lernphase, gelangte sie auf die Startseite der Klausurphase, auf der alle sechs Aufgaben in der durch die jeweilige Experimentalbedingung definierten Reihenfolge abgebildet waren. Zusätzlich enthielt diese Seite die Aufforderung, alle Aufgaben gründlich zu lesen und dann eine

der Aufgaben zur Bearbeitung durch Anklicken des entsprechenden Links in der Navigationsleiste am linken Bildschirmrand auszuwählen. Die Versuchsperson wurde daran erinnert, dass sie die Aufgaben in jeder beliebigen Reihenfolge bearbeiten könnte. In der Navigationsleiste waren die Aufgaben durch Hyperlinks gemäß der durch die Experimentalbedingung definierten Reihenfolge repräsentiert. Das Anklicken eines solchen Links führte dazu, dass die entsprechende Aufgabe auf dem Bildschirm dargestellt wurde. Auf dieser Aufgabenseite führte ein weiterer Link zu dem entsprechenden Lösungsformular, auf dem die Versuchsperson ihre Antworten eingeben konnte. Nach Abschicken der Lösung an den Server wurde erneut die Übersichtsseite mit allen (d.h. mit den bereits bearbeiteten sowie mit den noch nicht gelösten) Aufgaben auf dem Bildschirm dargestellt, und die Versuchsperson konnte die nächste Aufgabe zur Bearbeitung auswählen. Bereits bearbeitete Aufgaben konnten nicht erneut zur Bearbeitung ausgewählt werden. Nachdem alle sechs Aufgaben bearbeitet worden waren, wurde automatisch eine Seite aufgerufen, die über das Ende der Problemlösephase informierte.

Im Anschluss wurden die Versuchspersonen noch gebeten, eine erweiterte Version des am Anfang des Experiments ausgefüllten Vorwissenstests als Wissenstest zu bearbeiten, um etwaige Veränderungen in ihrem konzeptuellen Wissen zu registrieren.

Versuchsdesign. Als erste unabhängige Variable wurde die *Präsentationssequenz* der zu lösenden sechs Kombinatorikaufgaben in zwei Ausprägungen interindividuell variiert. In der günstigen Sequenz waren die Aufgabenkategorien entsprechend der zuvor beschriebenen Ähnlichkeitsbeziehungen angeordnet, d.h. die Aufgabensequenz begann mit Permutationen, im Anschluss folgten Variationen und am Ende wurden Kombinationsaufgaben präsentiert – jeweils ohne Wiederholung. Innerhalb jeder dieser Aufgabenkategorien erfolgte die Aufgabenpräsentation in aufsteigender Komplexitätsabfolge, d.h. es wurde zunächst die einfache und dann die komplexe Aufgabe einer Aufgabenkategorie dargeboten. Die ungünstige Sequenz begann mit der Präsentation der Kombinationen, anschließend folgten Permutationen, und am Ende wurden die Variationsaufgaben dargeboten. Innerhalb der drei Aufgabentypen waren die Aufgaben in absteigender Komplexitätsabfolge präsentiert. Die Versuchspersonen wurden den beiden Präsentationssequenzbedingungen zufällig zugewiesen.

Als zweite unabhängige Variable fungierte das *domänenspezifische Vorwissen* der Versuchspersonen. Die Versuchspersonen wurden nach der Beendigung des Experiments mithilfe eines Mediansplits anhand ihrer Werte im Vorwissenstest in eine Gruppe mit niedrigem und in eine Gruppe mit hohem Vorwissen eingeteilt. Die Mediansplits wurden für jede der beiden Sequenzbedingungen separat durchgeführt.

Es resultierte ein vollständig gekreuztes 2x2-Design mit den Faktoren Präsentationssequenz (günstig/ungünstig) und Vorwissen (hoch/niedrig) mit jeweils 20 Versuchspersonen pro Experimentalbedingung (bzw. $n = 19$ in der Bedingung günstige Sequenz/hohes Vorwissen). Innerhalb der vier Experimentalbedingungen wurde zusätzlich zwischen Versuchspersonen unterschieden, die eine eigene Sequenzierung der zu bearbeitenden Aufgaben vorgenommen hatten (Sequenzierer) und solchen, die die Präsentationssequenz für die Aufgabenbearbeitung beibehalten hatten (Beibehalter). Diese Ausdifferenzierung bezüglich des Sequenzierungsverhaltens wurde in die nachfolgenden statistischen Analysen als dritter Faktor einbezogen (*Sequenzierung*), um die Auswirkung des strategischen Verhaltens der Versuchspersonen auf verschiedene Performanzmaße zu bestimmen.

Abhängige Variablen. Als abhängige Variablen fungierten die *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung* (insgesamt sowie getrennt nach der Performanz für einfache und komplexe Aufgaben), die *Verweildauer in der Testphase* in Sekunden, die Häufigkeit, mit der von der Präsentationssequenz abgewichen wurde (*Häufigkeit der Sequenzierung*) sowie die *Qualität des Sequenzierungsverhaltens*. Zusätzlich wurde die *Performanz im Wissenstest* am Ende des Experiments bestimmt. Neben diesen Leistungs- und Sequenzierungsmaßen wurden verschiedene demografische Daten sowie Zeitdaten zum Lernverhalten der Versuchsperson registriert. Die Zeitdaten ergaben sich aus den *logfile*s, wobei die Verweildauern auf den einzelnen Seiten zu verschiedenen Kategorien zusammengefasst wurden (Verweildauer auf Beispielseiten bzw. Beispielzeit, Verweildauer auf abstrakter Lerninformation etc.).

Zur Bestimmung der *Performanz bei der Aufgabenbearbeitung* wurde folgendes Schema verwendet: Für jede der Aufgaben mussten fünf Angaben gemacht werden – das richtige Lösungsprinzip musste festgestellt und die Variablenwerte für vier Variablen mussten ausgewählt werden. Wurde das Lösungsprinzip korrekt identifiziert, erhielt die Versuchsperson für diesen Lösungsaspekt einen Punkt. Die korrekte Bestimmung des Lösungsprinzips umfasste drei Einzelentscheidungen, nämlich bezüg-

lich der Frage, (1) ob es sich bei der Aufgabe um eine Permutation, Variation oder Kombination handelte, (2) ob die Aufgabe vom Typ 'mit' oder 'ohne Wiederholung' war und (3) ob die Aufgabe einen Standard- oder einen Spezialfall darstellte. Für jede falsch getroffene Entscheidung wurde 1/3 Punkt abgezogen. Die resultierende Punktezahl wurde doppelt gewichtet, um die Bedeutung der Identifikation des Lösungsprinzips gegenüber der Formelinstanziierung durch Auswahl der korrekten Variablenwerte stärker hervorzuheben. Die korrekte Identifikation jedes der vier Variablenwerte wurde jeweils mit einem Punkt bewertet. Es resultierten also pro Aufgabe maximal sechs Punkte, wobei zwei Punkte auf die Identifikation des Lösungsprinzips und vier Punkte auf die Bestimmung der Variablenwerte zurückgingen. Insgesamt ergaben sich für alle Aufgaben maximal 36 Punkte – basierend auf diesem Wert wurde die Performanz bei der Aufgabebearbeitung in Prozent berechnet und als abhängige Variable verwendet. Neben diesem Gesamtperformanzmaß wurde eine Bestimmung der Performanzraten getrennt nach einfachen und komplexen Aufgaben vorgenommen, um der Tatsache gerecht werden zu können, dass diese beiden Maße sich nicht in allen Fällen gleichläufig veränderten.

Als zweites Performanzmaß wurde die *Verweildauer in der Testphase* in Sekunden gemessen. Dieses Gesamtmaß wurde in zwei Teilkomponenten aufgeteilt, nämlich einerseits in einen Anteil, der durch das Verweilen auf der alle Aufgaben darstellenden Überblicks- und Auswahlseite verursacht wurde (*Auswahlzeit*), und andererseits in einen Anteil, der in die eigentliche Lösung der Aufgaben investiert wurde und durch das Verweilen auf den einzelnen Aufgabenstellungen und den entsprechenden Lösungsformularen zustande kam (*Lösungszeit*).

Zur Analyse des Sequenzierungsverhaltens der Versuchspersonen wurden zwei Maße verwendet: Um einen Eindruck bezüglich der *Häufigkeit der Sequenzierung* zu erhalten, wurden zunächst Versuchspersonen danach klassifiziert, ob sie überhaupt von der vorgegebenen Präsentationssequenz abgewichen waren oder nicht. Darüber hinausgehend wurde ein Maß bestimmt, das zum Ausdruck brachte, inwieweit Versuchspersonen einfache Aufgaben an den Anfang einer Bearbeitungssequenz gestellt hatten. Diese abhängige Variable wurde auf Grund der Ergebnisse aus der in Kapitel 5 beschriebenen Fragebogenstudie gewählt, in der sich die Aufgabenkomplexität als entscheidendes und gegenüber der strukturellen Ähnlichkeit dominierendes Kriterium zur Festlegung einer Bearbeitungssequenz herausgestellt hatte.

Die *Präferenz für einfache Aufgaben am Beginn einer Bearbeitungssequenz* wurde wie folgt bestimmt: Zunächst wurde für jede der drei einfachen Aufgaben die Differenz zwischen der durch die Präsentationssequenz vorgegebenen Position und der von der Versuchsperson für die jeweilige Aufgabe gewählten Bearbeitungsposition gebildet. Diese Differenzen wurden für alle drei einfachen Aufgaben aufsummiert. Das resultierende Maß nahm negative Werte an, wenn einfache Aufgaben an späteren Positionen bearbeitet wurden – im Vergleich zu denjenigen Positionen, an denen sie in der Präsentationssequenz dargeboten wurden. Werte von Null entstanden, wenn die Bearbeitungs- und Präsentationssequenz identisch waren oder wenn sich Positionsveränderungen ausglich, so dass keine klare Präferenz der Versuchspersonen erkennbar war. Schließlich bildeten positive Werte einen Indikator für die Präferenz von Versuchspersonen, die Aufgabenbearbeitung mit einfachen Aufgaben zu beginnen, d.h. die einfachen Aufgaben an Positionen zu bearbeiten, die *vor* ihren jeweiligen Positionen in der Präsentationssequenz lagen.

Zur Bestimmung der Performanz im Vorwissens- und im Wissenstest wurde zunächst für jede korrekte Antwort im Vorwissenstest und im am Ende des Experiments durchgeführten Wissenstest ein Punkt vergeben. Die Anzahl erreichter Punkte wurde an der Anzahl vorhandener Testitems relativiert und in Prozentwerte umgerechnet, so dass sich jeweils ein *Prozentsatz korrekter Antworten im Vorwissenstest* bzw. im *Wissenstest* ergab.

Ergebnisse

Überprüfung der Vergleichbarkeit der Eingangsvoraussetzungen. In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe zweier ANOVAS (Präsentationssequenz x Vorwissen) überprüft, ob die Versuchspersonen sowohl bezüglich der im Vorwissenstest erreichten Punkte als auch bezüglich der Zeit, die sie zum Studium der Lernbeispiele aufgewendet hatten, vergleichbar waren (Tabelle 23). Für die Variable *Prozentsatz korrekter Antworten im Vorwissenstest* ergab sich erwartungsgemäß ein hochsignifikanter Unterschied der Vorwissensbedingungen ($F(1,75) = 189,04$; $MSE = 85,77$; $p < .001$), während sich keine Unterschiede zwischen den beiden Präsentationsbedingungen ($F(1,75) = 2,02$; $MSE = 85,77$; $p > .15$) zeigten und auch keine Interaktion der beiden Faktoren vorlag ($F < 1$).

Die Durchführung der gleichen Analyse für die *Beispielzeit* ergab weder Haupteffekte für die Faktoren Präsentationssequenz und Vorwissen noch eine Interaktion (alle $F < 1$). Da sich jedoch bereits in früheren Untersuchungen mit HYPERCOMB gezeigt hat, dass es sich bei der Abrufhäufigkeit von illustrierenden Beispielen bzw. bei der Verweildauer auf Beispielinformationen um den bedeutsamsten Prädiktor für die spätere Problemlöseperformanz handelt (Gerjets & Scheiter, 2003; Gerjets et al., 2000, 2002), wurde der Zusammenhang zwischen der Beispielzeit und der Performanz bei der Aufgabenbearbeitung auch in der vorliegenden Untersuchung ermittelt. Es ergab sich eine Korrelation von $r = 0.45$ ($p < .001$; $N = 79$), die erneut die Bedeutung der Beispielzeit als Lernmaß unterstreicht. Aus diesem Grund und auf Grund der Tatsache, dass die Beispielzeit eine hohe Variabilität innerhalb der einzelnen Versuchsbedingungen aufwies, wurde diese Variable als Kovariate in alle nachfolgenden varianzanalytischen Auswertungen aufgenommen.

Zusätzlich enthalten alle nachfolgenden Analysen neben den beiden Faktoren Präsentationssequenz und Vorwissen einen dritten Faktor, der indiziert, ob Versuchspersonen bei der Bearbeitung der Aufgaben von der jeweiligen Präsentationssequenz abgewichen waren und die Aufgaben in einer anderen Bearbeitungsreihenfolge gelöst hatten (so genannte Sequenzierer) oder nicht (so genannte Beibehalter). Dieser Faktor wird im Folgenden als *Sequenzierung* bezeichnet.

Die nachfolgende Darstellung der Ergebnisse ist in drei Abschnitte unterteilt: Zunächst werden Effekte der Präsentationssequenz und des Vorwissens für die Problemlöseperformanz, die Verweildauer in der Testphase und die Performanz im Wissenstest berichtet, anschließend wird eine Analyse des Sequenzierungsverhaltens in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz und vom Vorwissen vorgenommen. In einem dritten Schritt werden Auswirkungen dieses Sequenzierungsverhaltens auf die Performanz beschrieben.

Effekte der Präsentationssequenz und des Vorwissens. Die Analyse der *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung* mit Hilfe einer ANCOVA (Präsentationssequenz \times Vorwissen \times Sequenzierung mit der Kovariate Beispielzeit) zeigte, dass Versuchspersonen, die die Aufgaben in der günstigen Sequenz präsentiert bekommen hatten, bessere Leistungen erbrachten als solche Versuchspersonen, denen eine ungünstige Bearbeitungsreihenfolge nahe gelegt worden war ($F(1,70) = 3,99$; $MSE = 206,49$; $p = .05$). Es zeigte sich kein Effekt des Vorwissens, noch ergab

sich eine Interaktion zwischen den Faktoren Präsentationssequenz und Vorwissen (beide $F < 1$). Der Einfluss der Kovariate Beispielzeit auf die Problemlöseperformanz erwies sich als hochsignifikant ($F(1,70) = 20,06$; $MSE = 206,49$; $p < .001$). Im Anschluss an diese Analyse der Gesamtbearbeitungsleistung wurden die Performanzraten für einfache und komplexe Aufgaben getrennt ausgewertet.

Die Durchführung der gleichen ANCOVA für die *Performanz bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben* ergab eine Replikation des gerade beschriebenen Befundmusters: Versuchspersonen mit einer günstigen Präsentationssequenz der Aufgaben zeigten bessere Bearbeitungsleistungen als Versuchspersonen in den Bedingungen mit einer ungünstigen Präsentationssequenz ($F(1,70) = 4,19$; $MSE = 242,99$; $p < .05$). Es zeigte sich kein Effekt des Vorwissens für die Bearbeitung einfacher Aufgaben, noch ergab sich eine Interaktion zwischen den Faktoren Präsentationssequenz und Vorwissen (beide $F < 1$). Auch hier erwies sich die Beispielzeit als bedeutsame Kovariate ($F(1,70) = 6,84$; $MSE = 242,99$; $p < .05$).

Tabelle 23: Performanz (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens

	Günstige Sequenz		Ungünstige Sequenz	
	<i>Hohes Vorwissen</i> (n = 19)	<i>Niedriges Vorwissen</i> (n = 20)	<i>Hohes Vorwissen</i> (n = 20)	<i>Niedriges Vorwissen</i> (n = 20)
Vorwissen	56,37	26,40	52,10	24,75
Beispielzeit	637	597	612	532
Gesamtperformanz	74,61	72,08	70,28	65,79
- Einfache Aufgaben	85,65	89,35	83,80	78,24
- Komplexe Aufgaben	62,77	54,81	56,76	53,33
Verweildauer (Testphase)	1287	1248	1308	1282
Wissenstest	87,37	67,00	71,50	66,00

Hinsichtlich der *Performanz bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben* war kein Effekt der Präsentationssequenz nachweisbar ($F(1,70) = 1,73$; $MSE = 357,65$; $p > .15$), ebenso wenig konnte eine Einflussnahme des Vorwissens ($F(1,70) = 1,05$; $MSE = 357,65$; $p > .30$) oder eine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F(1,70) = 1,24$;

$MSE = 357,65$; $p > .20$) festgestellt werden. Die Performanz bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben wurde dagegen deutlich durch die Beispielzeit als Kovariate beeinflusst ($F(1,70) = 21,63$; $MSE = 357,65$; $p < .001$).

Im Hinblick auf die *Verweildauer in der Testphase des Experiments* ergaben sich keine bedeutsamen Unterschiede in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz oder dem Vorwissen, ebenso wenig war eine Interaktion nachweisbar (alle $F < 1$). Lediglich die Kovariate hatte einen Einfluss auf diese abhängige Variable ($F(1,70) = 8,43$; $MSE = 119174,44$; $p < .01$).

Bezüglich des *Prozentsatzes korrekter Antworten im Wissenstest* ergaben sich folgende Befunde: Erwartungsgemäß zeigten Lerner mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen auch im Wissenstest am Ende des Experiments noch geringere konzeptuelle Kenntnisse als Lerner, die eingangs bereits über ein relativ hohes Vorwissen verfügten ($F(1,70) = 6,87$; $MSE = 342,04$; $p = .01$). Darüber hinaus zeigten Versuchspersonen, die die Testaufgaben in der günstigen Sequenz präsentiert bekommen hatten, bessere Leistungen im Wissenstest als jene Personen mit ungünstiger Präsentationssequenz ($F(1,70) = 5,18$; $MSE = 342,04$; $p < .05$). Schließlich ergab sich eine marginal signifikante Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F(1,70) = 3,61$; $MSE = 342,04$; $p < .10$): Während sich für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen ein Vorteil der günstigen Präsentationssequenz der Problemlöseaufgaben im Hinblick auf den anschließenden Wissenstest ergab ($t(38) = 2,62$; $p = .01$; zweiseitig), bewirkte die Variation der Präsentationssequenz keinen Unterschied für Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen ($t(38) = -0,15$; $p > .80$; zweiseitig). Auch für den Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest erwies sich die Kovariate Beispielzeit als hoch bedeutsamer Prädiktor ($F(1,70) = 14,48$; $MSE = 342,04$; $p < .001$).

Zusammenfassend ließ sich ein Sequenzeffekt für die Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung nachweisen, der im Wesentlichen durch Leistungsunterschiede bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben hervorgerufen wurde. Dieser Sequenzeffekt zeigte sich entgegen der ursprünglichen Erwartung unabhängig vom Vorwissen der Versuchspersonen, d.h. sowohl Versuchspersonen mit niedrigem als auch mit hohem domänenspezifischem Vorwissen profitierten von einer günstigen Anordnung der Aufgaben entsprechend der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgabenkategorien und entsprechend der relativen Komplexität der Aufgaben einer Aufgabenkategorie. Zusätzlich ergaben sich für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen bessere Leistungen im Wissenstest, wenn zuvor die Testaufgaben in der günstigen Prä-

sentationssequenz dargeboten worden waren. Die Verweildauer in der Testphase wurde dagegen nicht von einer Variation der Präsentationssequenz der Testaufgaben beeinflusst.

Sequenzierungsverhalten. Um zu bestimmen, inwieweit das Sequenzierungsverhalten systematisch von der Präsentationssequenz und vom Vorwissen der Versuchspersonen abhing, wurde das Verhältnis von Sequenzierern und Beibehaltern in den vier Experimentalbedingungen analysiert (Tabelle 24).

Tabelle 24: Absolute Anzahl von Sequenzierern und Beibehaltern als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens

	<i>Günstige Sequenz</i>		<i>Ungünstige Sequenz</i>	
	<i>Beibehalter</i>	<i>Sequenzierer</i>	<i>Beibehalter</i>	<i>Sequenzierer</i>
Hohes Vorwissen	15	4	7	13
Niedriges Vorwissen	14	6	8	12
Summe	29	10	15	25

Erwartungsgemäß zeigte sich, dass Versuchspersonen sensibel auf die Qualität der Präsentationssequenz reagierten, indem sie seltener von der günstigen Sequenz abwichen als von der ungünstigen Sequenz. Der entsprechende X^2 -Test über die vier Spaltensummenwerte (letzte Zeile in Tabelle 24) erbrachte eine deutliche Abhängigkeit der Verteilung von Beibehaltern und Sequenzierern von der Präsentationssequenz der Aufgaben ($X^2(1) = 10,87; p = 001$). Ein weiterer X^2 -Test für die jeweiligen Summenwerte für Beibehalter und Sequenzierer als Funktion des Vorwissens der Versuchspersonen zeigte, dass dagegen das Sequenzierungsverhalten unabhängig von diesem Faktor war ($X^2(1) = 0,02; p > .90$). In einem letzten Schritt wurde geprüft, ob die Verteilung der Sequenzierer auf die vier interessierenden Zellen (in Tabelle 24 grau unterlegt) unabhängig von den beiden Randfaktoren Vorwissen und Präsentationssequenz war oder ob diese eine Funktion der kombinierten Wirkung beider Faktoren im Sinne einer Interaktion darstellte. Der entsprechende 4-Felder-Test erbrachte einen statistisch nicht bedeutsamen Wert von $X^2(1) = 0,81; p > .25$. Es konnte folglich nicht gezeigt werden, dass gerade Versuchspersonen mit hohem Vorwissen häufiger ein strategisch günstiges Verhalten zeigten, indem sie von einer ungünstigen Präsentationssequenz abwichen.

Eine Analyse der Qualität der Aufgabensequenzierung zeigte, dass die vorgenommenen Sequenzierungen erwartungsgemäß im Wesentlichen darin bestanden, zunächst einfache Aufgaben zu bearbeiten und zwar ungeachtet der strukturellen Ähnlichkeiten zwischen einfachen und komplexen Aufgaben der gleichen Aufgabenkategorie (Abbildung 17). Für diese Analyse wurden für die insgesamt 35 Versuchspersonen, die eine Sequenzierung der Aufgaben vorgenommen hatten, die oben beschriebenen *Positionsdifferenzwerte für einfache Testaufgaben* berechnet und zunächst innerhalb jeder der vier Sequenzbedingungen mittels ungerichteter t-Tests gegen den Kriteriumswert Null getestet. Signifikant von Null abweichende positive Werte stehen für eine Präferenz von Versuchspersonen, die Aufgabenbearbeitung mit einfachen Aufgaben zu beginnen. Zusätzlich wurden die Werte mit Hilfe einer ANCOVA hinsichtlich möglicher Abhängigkeiten von der Präsentationssequenz und vom Vorwissen untersucht.

Der Vergleich der Positionsdifferenzwerte mit dem Kriteriumswert Null mittels ungerichteter Einzelvergleiche ergab für die Sequenzierer von drei der vier Experimentalgruppen einen deutlichen Nachweis für die Präferenz, zunächst einfache Aufgaben zu lösen, bevor die komplexeren Aufgaben bearbeitet werden (ungünstige Sequenz/niedriges Vorwissen: $t(11) = 3,28$; $SD = 2,38$; $p < .01$; ungünstige Sequenz/hohes Vorwissen: $t(12) = 4,14$; $SD = 2,15$; $p = .001$; günstige Sequenz/niedriges Vorwissen: $t(5) = 3,00$; $SD = 1,23$; $p < .05$). Lediglich Versuchspersonen mit hohem domänenspezifischen Vorwissen, die die Aufgaben in einer günstigen Sequenz präsentiert bekommen hatten, verzichteten darauf, die einfachen Aufgaben an den Anfang der Bearbeitungssequenz zu ziehen (günstige Sequenz/hohes Vorwissen: $t(3) = -0,40$; $SD = 1,26$; $p > .70$) und verwendeten andere Sequenzierungsstrategien ($n = 4$).

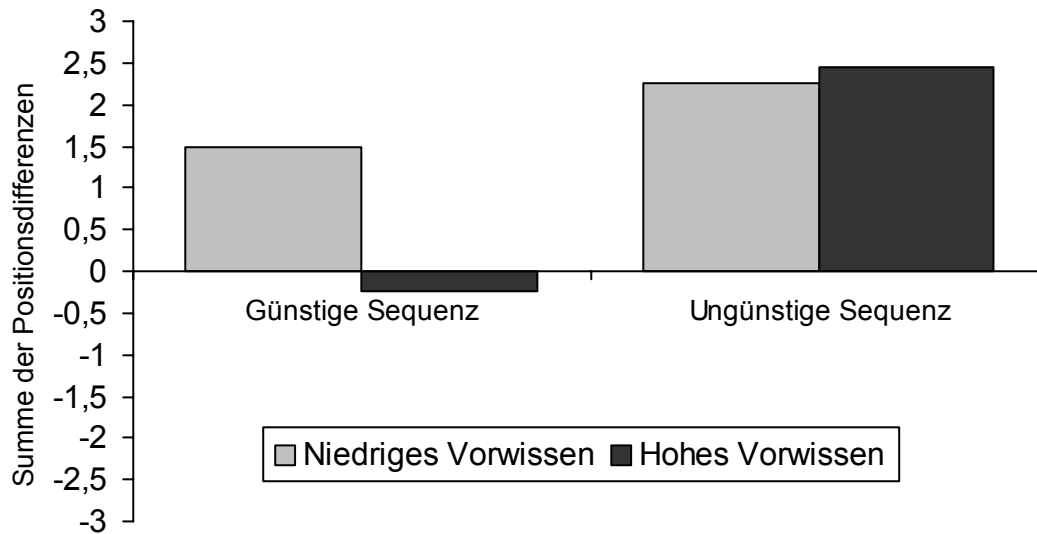


Abbildung 17: Mittlere aufsummierte Positionsdifferenzen für die Bearbeitung einfacher Testaufgaben als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens für Sequenzierer

Die Analyse des Präferenzmaßes mit Hilfe einer zweifaktoriellen ANCOVA (Präsentationssequenz \times Vorwissen mit der Kovariate Beispielzeit) ergab folgende Befunde: Die Präferenz zur Bearbeitung einfacher Aufgaben am Beginn einer Sequenz war bei Sequenzierern in der ungünstigen Sequenz stärker ausgeprägt als in der günstigen Sequenz ($F(1,31) = 5,27$; $MSE = 4,23$; $p < .05$), während keine Einflussnahme des Vorwissens vorlag ($F < 1$). Die Interaktion zwischen beiden Faktoren erwies sich als statistisch nicht bedeutsam ($F(1,31) = 1,51$; $MSE = 4,23$; $p > .20$). Die Kovariate Beispielzeit hatte keinen Einfluss ($F < 1$).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Versuchspersonen auf die unterschiedliche Qualität der Präsentationssequenz reagierten, indem sie diese im Falle einer günstigen Anordnung überwiegend als Bearbeitungsreihenfolge beibehielten und lediglich im Fall einer ungünstigen Sequenz davon abwichen und eine eigene Bearbeitungsreihenfolge erstellten. Diese war – mit Ausnahme der Bedingung günstige Sequenz/hohes Vorwissen – dadurch gekennzeichnet, dass einfache Aufgaben an den Anfang der Bearbeitungsreihenfolge gestellt wurden. Im nachfolgenden Abschnitt wird dargestellt, welche Auswirkungen dieses Sequenzierungsverhalten auf die Performanz hatte.

Effekte des Sequenzierungsverhaltens. Um zu bestimmen, wie sich die Problemlöseleistung in Abhängigkeit vom Sequenzierungsverhalten der Versuchspersonen veränderte, wurden in einem letzten Schritt diejenigen Effekte der bereits berichteten dreifaktoriellen ANCOVA (Präsentationssequenz \times Vorwissen \times Sequenzierung mit Kovariate Beispielzeit) ausgewertet, die sich auf den Haupteffekt Sequenzierung sowie auf Interaktionen zwischen dem Sequenzierungsfaktor und den anderen beiden Faktoren beziehen.

Bei der Analyse der *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung* (Abbildung 18) ergab sich kein Effekt des Sequenzierungsfaktors ($F(1,70) = 1,89$; $MSE = 206,49$; $p > .15$) und keine Interaktion dieses Faktors mit der Präsentationssequenz ($F < 1$). Eine marginal signifikante Interaktion des Sequenzierungsfaktors mit dem Vorwissen der Versuchspersonen ($F(1,70) = 3,71$; $MSE = 206,49$; $p < .10$) indizierte allerdings, dass Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen nicht von einer Umsequenzierung der Aufgaben profitierten (Sequenzierer: $M = 67,75\%$, $SD = 19,75$; Beibehalter: $M = 69,91\%$, $SD = 10,54$; $t(38) = -0,44$; $p > .60$; zweiseitig), während für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen mit der Aufgabensequenzierung eine leichte, aber im Einzelvergleich nicht signifikante Leistungsverbesserung verbunden war (Sequenzierer: $M = 76,20\%$, $SD = 14,78$; Beibehalter: $M = 69,52\%$, $SD = 18,49$; $t(37) = 1,22$; $p > .20$; zweiseitig). Die Interaktion zwischen allen drei Faktoren erwies sich als statistisch bedeutungslos ($F < 1$).

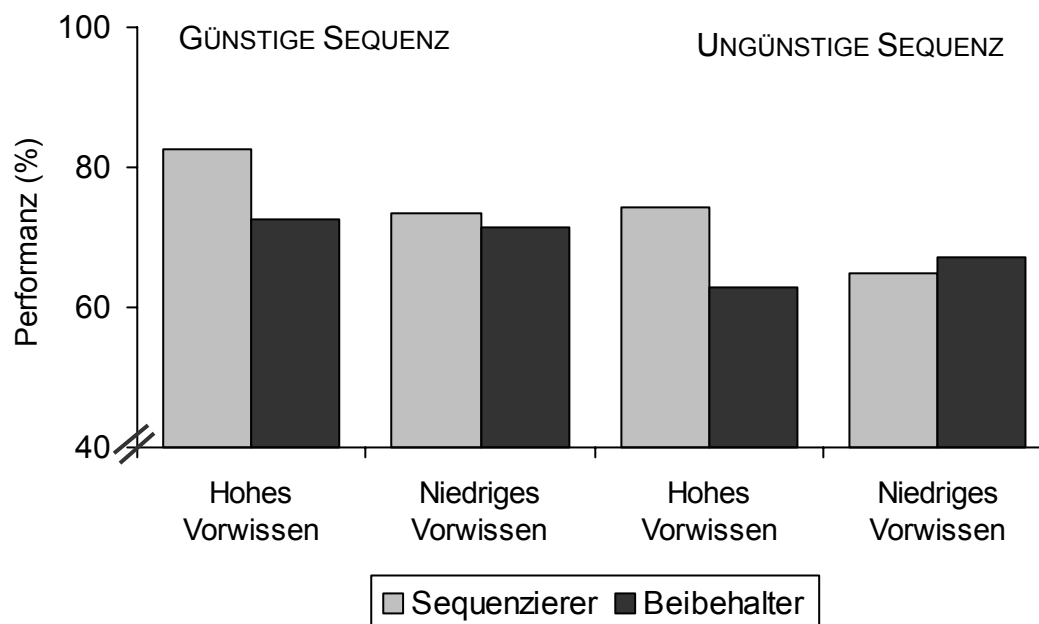


Abbildung 18: Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung in % als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens

Hinsichtlich der *Performanz bei der Bearbeitung einfacher Testaufgaben* (Abbildung 19) ergab sich ein sehr ähnliches Befundmuster. Es ergab sich kein Haupteffekt für den Sequenzierungsfaktor ($F < 1$), allerdings zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen diesem Faktor und dem Vorwissen der Versuchspersonen ($F(1,70) = 5,16$; $MSE = 242,99$; $p < .05$): Versuchspersonen mit hohem Vorwissen, die eine eigenständige Sequenzierung der Aufgaben vornahmten, zeigten in der Tendenz bessere Leistungen als solche, die die Präsentationssequenz als Bearbeitungsreihenfolge nutzten. Der entsprechende spezifische Kontrast erwies sich jedoch als statistisch nicht bedeutsam (Sequenzierer: $M = 89,11\%$, $SD = 9,71$; Beibehalter: $M = 82,15\%$, $SD = 19,99$; $t(37) = 1,32$; $p > .15$; zweiseitig). Für Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen ließ sich dagegen eine marginal signifikante Verschlechterung der Performanz durch Sequenzierung nachweisen (Sequenzierer: $M = 78,81\%$, $SD = 20,66$; Beibehalter: $M = 87,88\%$, $SD = 11,95$; $t(37) = -1,74$; $p < .10$; zweiseitig). Dieser Effekt ging im Wesentlichen auf Unterschiede in der ungünstigen Sequenz zurück, die darauf hindeuteten, dass Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen in dieser Bedingung nicht in der Lage waren, eine geeignetere Sequenz zu identifizieren und durch den Versuch der Sequenzierung ihre Performanz stattdessen sogar beeinträchtigten.

Die erwartete dreifache Interaktion, dass sich eine Performanzverbesserung durch Sequenzierung nur im Fall des Abweichens von einer ungünstigen Präsentationssequenz und im Fall hinreichenden Vorwissens ergeben sollte, verfehlte allerdings die Signifikanzgrenze ($F(1,70) = 1,39$; $MSE = 242,99$; $p > .20$). Ebenso ergab sich keine Interaktion zwischen dem Sequenzierungsfaktor und der Präsentationssequenz ($F < 1$).

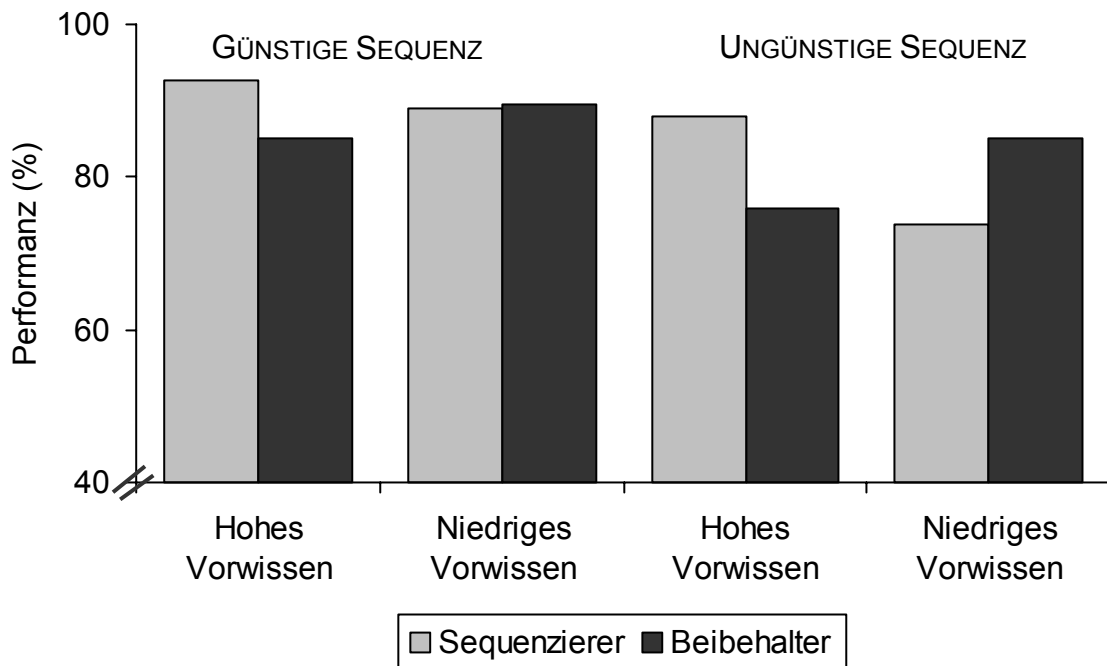


Abbildung 19: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens

Bezüglich der *Fehlerrate bei der Bearbeitung komplexer Testaufgaben* (Abbildung 20) ergab sich eine tendenzielle Verbesserung für Versuchspersonen, die eine Sequenzierung der Aufgaben vornahmen gegenüber solchen Versuchspersonen, die die Präsentationssequenz als Bearbeitungsreihenfolge beibehielten ($F(1,70) = 2,96$; $MSE = 357,65$; $p < .10$). Als statistisch bedeutungslos erwiesen sich dagegen sowohl die Interaktion des Sequenzierungsfaktors mit der Präsentationssequenz ($F < 1$), mit dem Vorwissen der Versuchspersonen ($F(1,70) = 1,11$; $MSE = 357,65$; $p > .20$) als auch die Interaktion aller drei Faktoren ($F < 1$).

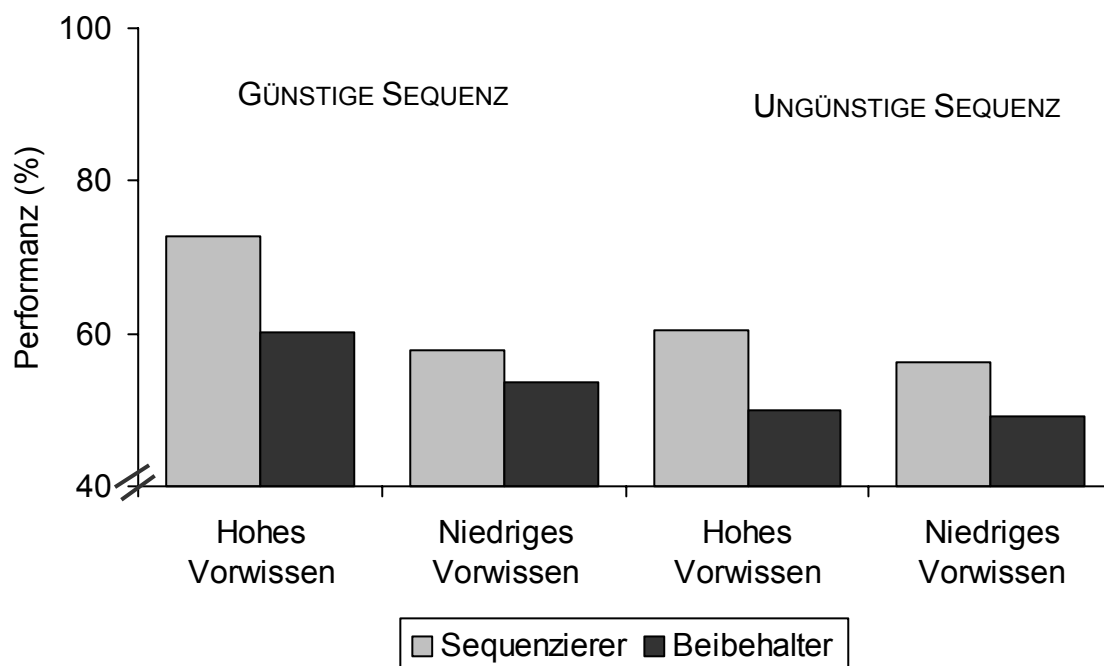


Abbildung 20: Problemlöseperformanz in % bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens

Ein Einfluss der Aufgabensequenzierung auf den *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest* ließ sich nicht beobachten: Der Haupteffekt des Sequenzierungsfaktors verfehlte die Signifikanzgrenze ($F(1,70) = 1,90$; $MSE = 342,04$; $p > .15$), ebenso wenig war eine Interaktion mit der Präsentationssequenz oder mit dem Vorwissen nachweisbar (Sequenzierung \times Präsentationssequenz: $F(1,70) = 1,29$; $MSE = 342,04$; $p > .25$; Sequenzierung \times Vorwissen: $F < 1$). Die Interaktion zwischen allen drei Faktoren erwies sich als statistisch bedeutungslos ($F < 1$).

Eine Analyse der *Verweildauern in der Testphase* (Abbildung 21) erbrachte einen deutlichen Haupteffekt des Sequenzierungsfaktors ($F(1,70) = 5,45$; $MSE = 119174,44$; $p < .05$): Versuchspersonen, die eine Sequenzierung der Aufgaben vornahmen, hielten sich länger in der Testphase des Experiments auf als Versuchspersonen, die die Aufgaben in der vorgegebenen Präsentationssequenz bearbeiteten. Es ergaben sich keine statistisch bedeutsamen Interaktionen mit der Präsentationssequenz oder dem Vorwissen der Versuchspersonen (beide $F < 1$). Die dreifache Interaktion war ebenfalls nicht signifikant ($F(1,70) = 1,35$; $MSE = 119174,44$; $p > .20$).

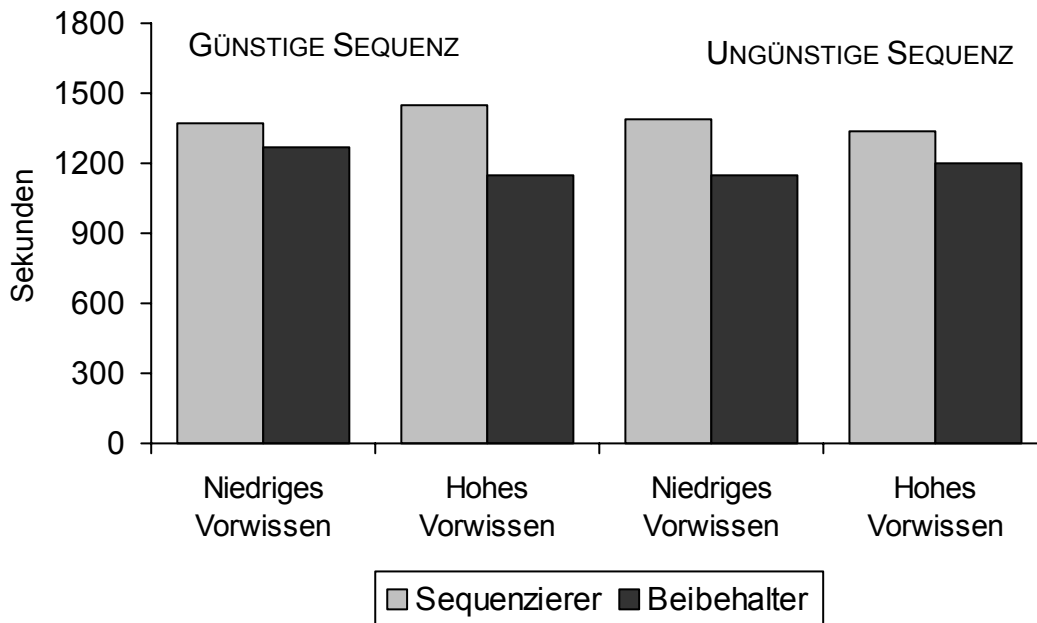


Abbildung 21: Verweildauer in Sekunden in der Testphase als Funktion des Sequenzierungsverhaltens, der Präsentationssequenz und des Vorwissens

Von besonderem Interesse ist, wodurch der zusätzliche Zeitbedarf der Sequenzierer während der Testphase hervorgerufen wurde. Um dieser Frage nachzugehen, wurde die gleiche Analyse getrennt nach den beiden Teilkomponenten der Verweildauer durchgeführt (vgl. Tabelle 25), d.h. einerseits für die Lösungszeit, die durch das Verweilen auf den einzelnen Aufgabenstellungen und den entsprechenden Lösungsformularen zustande kam, und andererseits für die Auswahlzeit, die durch das Verweilen auf der alle Aufgaben darstellenden Überblicksseite verursacht wurde. Auf dieser Überblicksseite konnten alle Testaufgaben durchgelesen werden, vor allem konnten dort aber auch Vergleiche zwischen den einzelnen Aufgaben angestellt werden, unter anderem mit dem Ziel, Aufgaben für die Bearbeitung auszuwählen und so eine Bearbeitungssequenz festzulegen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Zeitdaten nur in Abhängigkeit vom Sequenzierungsverhalten der Versuchspersonen dargestellt, da sich weder das Vorwissen der Versuchspersonen noch die Präsentationssequenz der Aufgaben in diesen Analysen als bedeutsame Faktoren erwiesen.

Tabelle 25: Verweildauer in der Testphase, getrennt nach Lösungszeit und Auswahlzeit (in Sekunden) als Funktion des Sequenzierungsverhaltens

	Sequenzierer (<i>n</i> = 35)	Beibehalter (<i>n</i> = 44)
Gesamtverweildauer in der Testphase	1387	1197
Lösungszeit	1091	1010
Auswahlzeit	296	187

Eine Analyse der *Lösungszeit* ergab weder einen signifikanten Haupteffekt für den Sequenzierungsfaktor, noch ergaben sich statistisch bedeutsame Interaktionen mit einem oder beiden der anderen Faktoren. Die statistischen Kennwerte für den Haupteffekt Sequenzierung lauteten $F(1,70) = 1,26$; $MSE = 79933,11$; $p > .20$ sowie für die dreifache Interaktion $F(1,70) = 1,70$; $MSE = 79933,11$; $p > .15$. Für die Interaktion des Sequenzierungsfaktors mit der Präsentationssequenz und mit dem Vorwissen galt jeweils $F < 1$. Der zusätzliche Zeitbedarf der Sequenzierer wurde folglich nicht durch eine erhöhte Zeitinvestition für den Lösungsprozess verursacht.

Eine Analyse der *Auswahlzeit* ergab dagegen einen hoch signifikanten Effekt für den Faktor Sequenzierung ($F(1,70) = 14,77$; $MSE = 16197,82$; $p < .001$), während sich sämtliche Interaktionen als statistisch bedeutungslos erwiesen (alle $F < 1$). Der zusätzliche Zeitbedarf ergab sich folglich aus längeren Verweildauern auf der Überblicks- und Auswahlseite. Die Bedeutung dieses Befunds für die Konzipierung von Sequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie und für die Rückführung von Performanzunterschieden auf das Sequenzierungsverhalten – im Gegensatz zu einer Erklärung der Leistungsverbesserungen durch längere Problemlösezeiten (*time-on-task*-Argument) – werden im nächsten Abschnitt erörtert.

Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass es gegenüber einer a priori als ungünstig definierten Sequenz zu Verbesserungen in der Problemlöseperformanz kommt, wenn die zu lösenden Aufgaben in einer günstigen Sequenz präsentiert und bearbeitet werden. Diese günstige Sequenz ist dadurch gekennzeichnet, dass ähnliche Aufgabenkategorien aufeinander folgen und dass innerhalb einer Aufgabenkategorie die Aufgaben nach zunehmender Komplexität angeordnet sind. Nach dem inte-

grativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten sollte sie daher sowohl für einen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben bzw. zwischen Aufgabekategorien geeignet sein (vgl. Untersuchungshypothese 2) als auch für Lernen bei der Aufgabenbearbeitung (vgl. Untersuchungshypothese 1). Der beobachtbare Sequenzeffekt wurde vor allem durch Leistungsunterschiede bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben hervorgerufen. Entgegen der in den Untersuchungshypothesen 6 bzw. 7 formulierten ursprünglichen Erwartung wurde dieser Sequenzeffekt jedoch nicht durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen moderiert. Schließlich zeigten Problemlöser und zwar hier vor allem jene mit hohem Vorwissen ein besseres Verständnis für wesentliche Konzepte der Domäne (z.B. Bedeutung von Variablen, Wissen über Strukturmerkmale), wenn sie die Testaufgaben in einer günstigen Sequenz präsentiert bekommen hatten. Dieses Ergebnis liefert weitere Evidenz, dass sich Bearbeitungssequenzen im Hinblick auf die Möglichkeit zum Lernen bei der Aufgabenbearbeitung unterscheiden können. Ähnliche Ergebnisse hatten sich schon in Experiment 1 zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben ergeben. Dort ermöglichte eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Aufgabensequenz den Erwerb von Wissen hinsichtlich struktureller Aufgabenmerkmale, welches sich für die anschließende Bearbeitung von Transferaufgaben als hilfreich erwies. Mit diesen Befunden wird das integrative Rahmenmodell gestützt, in dem dieser Lernprozess als wesentliche Komponente für die Entstehung von Sequenzeffekten angenommen wird.

Im Hinblick auf das Sequenzierungsverhalten konnte gezeigt werden, dass Versuchspersonen erstens eine Aufgabensequenzierung vornahmen (Untersuchungshypothese 8) und dass sie dabei zweitens sensibel auf die Qualität der Präsentationssequenz reagierten, indem sie die Aufgaben erwartungsgemäß vor allem dann umsequenzierten, wenn diese in einer ungünstigen Abfolge präsentiert wurden (Untersuchungshypothese 9). Versuchspersonen sequenzierten Aufgaben bevorzugt auf eine Weise, die es ermöglichte, zunächst einfache Aufgaben zu bearbeiten – ungeachtet der strukturellen Ähnlichkeiten zwischen einfachen und komplexen Aufgaben der gleichen Aufgabekategorie. Die Häufigkeit, mit der eine eigene Aufgabensequenzierung vorgenommen wurde, war dabei unabhängig vom Vorwissen der Versuchspersonen (keine Bestätigung von Untersuchungshypothese 10) und hing ausschließlich von der Qualität der Präsentationssequenz ab. Allerdings zeigten sich vorwissensabhängige qualitative Unterschiede im Sequenzierungsverhalten: Ver-

suchspersonen, die ein hohes Vorwissen aufwiesen und die die Aufgaben in der günstigen Sequenz präsentiert bekamen, zeigten nicht die für Sequenzierer der anderen Experimentalbedingungen nachweisbare Tendenz zur anfänglichen Bearbeitung einfacher Aufgaben. Dieser Befund ist jedoch auf Grund der geringen Anzahl von Personen, durch die er verursacht wurde ($n = 4$), nur sehr bedingt interpretierbar.

Auch die performanzbezogenen Konsequenzen einer Sequenzierung interagierten mit den Vorkenntnissen. Umsequenzierungen der Aufgaben waren mit moderaten Leistungsverbesserungen für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen assoziiert, während die Leistung von Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen abfiel, wenn diese eine Sequenzierung der Aufgaben vornahmen, anstatt die vorgegebene Präsentationssequenz als Bearbeitungsreihenfolge beizubehalten. Während dieser Befund einen Teil der Untersuchungshypothese 14 bestätigt, waren diese Effekte der Sequenzierung unerwarteterweise unabhängig von der Qualität der Präsentationssequenz, d.h. Umsequenzierungen führten für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen zu Leistungsverbesserungen bzw. für Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen zu Leistungsverschlechterungen unabhängig davon, ob von der günstigen oder von der ungünstigen Sequenz abgewichen wurde. Die erwartete Interaktion zwischen allen drei Faktoren konnte damit nicht nachgewiesen werden. Dieser Befund, der der Auffassung von Sequenzierung als Strategie zur Verbesserung ungünstiger Problemlösebedingungen zu widersprechen scheint, bildet einen Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen. Seine Bedeutung wird im Zusammenhang mit anderen Ergebnissen am Ende dieses Abschnitts diskutiert.

Für Versuchspersonen, die eine Umsequenzierung der Aufgaben vornahmen, ergaben sich längere Verweildauern auf der Überblicks- und Auswahlseite, während sich keinerlei Unterschiede hinsichtlich der Lösungszeiten für die einzelnen Aufgaben zwischen Sequenzierern und Beibehaltern beobachten ließen. Diese längere Auswahlzeit kann dahingehend interpretiert werden, dass Sequenzierer über eine möglichst günstige Aufgabenabfolge nachdenken und z.B. die zu lösenden Aufgaben miteinander vergleichen, um potenzielle, zwischen den Aufgaben bestehende Ähnlichkeiten zu identifizieren. Die Tatsache, dass sie auf dieser Seite länger verweilen und nicht mehr Zeit auf einzelne Aufgabenseiten verwenden, stützt die Konzipierung von Sequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie. Das heißt, die Strategie ist nicht auf kognitive Operatoren zur Lösung einer Aufgabe bezogen, sondern auf eine übergeordnete Steuerung des Problemlöseprozesses. Voraussetzung für einen

solchen Steuerungsprozess ist ein Überblick über die zu bearbeitenden Aufgaben, welcher durch eine länger andauernde Auseinandersetzung mit den strukturellen Merkmalen der Aufgaben auf der Überblicksseite erworben werden kann. Die Tatsache, dass Sequenzierer nicht mehr Zeit auf die Lösung der einzelnen Aufgaben aufwenden, spricht gegen eine reine *time-on-task* Argumentation, derzufolge die – wenn auch nur moderaten – besseren Leistungen von Sequenzierern auch lediglich auf eine größere Zeitinvestition in aufgabenbezogene Lösungsprozesse zurückgeführt werden könnten, ohne zusätzlich metakognitive Steuerungsprozesse zur Erklärung heranzuziehen.

Die nach den vorliegenden Befunden eher zu bevorzugende Rückführung leistungsförderlicher Effekte der Sequenzierung auf Vergleichsprozesse, die im Dienste einer metakognitiven Problemlösestrategie eingesetzt werden, wäre auch geeignet, um zu erklären, warum sich Effekte der Sequenzierung unabhängig von der Qualität der Präsentationssequenz zeigen. Die Instruktion zur Sequenzierung könnte nach dieser Erklärung eine ähnliche Wirkung haben wie explizite Instruktionen zum Vergleich von Aufgaben oder aber auch wie die in der Analogie-Forschung eingesetzten *hints* zur Förderung analogen Transfers (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Keane, 1987). Mit Hilfe dieser *hints* werden Versuchspersonen vor Beginn der Aufgabenbearbeitung auf die Nützlichkeit vorangegangener Problemlöseerfahrungen hingewiesen. Die Aufforderung, sich Aufgaben zur Bearbeitung auszuwählen und damit eine eigene Bearbeitungssequenz festzulegen, legt nahe, diese Aufgaben zunächst einzeln und dann in Relation zueinander zu analysieren. Eine Konsequenz einer solchen Analyse könnte sein, dass Strukturmerkmale der Aufgaben eher erkannt werden und genutzt werden können – vorausgesetzt, dass die Versuchspersonen hinreichendes Vorwissen mitbringen, um diese anspruchsvollen kognitiven Prozesse erfolgreich ausführen zu können. Erste Evidenz, dass eine Sequenzierungsinstruktion mit Leistungsverbesserungen einhergeht, weil sie Elaborations- und Vergleichsprozesse für die zu bearbeitenden Aufgaben fördert, hatte sich bereits in Experiment 2 zur Sequenzierung von Algebraaufgaben ergeben. Dort zeigten Personen, die eine Aufgabensequenzierung vorgenommen hatten, bessere Leistungen bei der anschließenden Bearbeitung von Transferaufgaben – und zwar unabhängig von der Qualität der zuvor vorgegebenen Präsentationssequenz. Eine korrekte Bearbeitung der Transferaufgaben setzt Wissen über Strukturmerkmale sowie über deren Übersetzung in Lösungsschritte voraus, so dass bekannte Lösungswege adaptiert werden können.

Eine Konsequenz dieses Erklärungsansatzes besteht darin, dass möglicherweise auch die in Experiment 4 beobachteten Sequenzeffekte nicht ‘automatisch’ entstehen, sondern von metakognitiven Prozessen und damit z.B. vom Vorhandensein der verwendeten Sequenzierungsinstruktion abhängig sind. Demnach sollten Performanzvorteile der günstigen Sequenz gegenüber einer ungünstigen Sequenz nur dann auftreten, wenn gleichzeitig eine tiefere Verarbeitung der Aufgaben hinsichtlich ihrer Relationen zueinander nahe gelegt wird, die es ermöglicht, Transferbeziehungen zwischen aufeinander folgenden Aufgaben zu erkennen und zu nutzen. Diese Annahme steht in Einklang mit der Überlegung, dass es sich beim Transfer zwischen voraussetzungsreichen Aufgaben um nichtautomatische Prozesse handelt (Weisberg et al., 1978), die deliberativ angestoßen werden müssen (VanLehn, 1996), damit es zu einer Wissensübertragung kommt. Dies unterscheidet – wie im integrativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten dargestellt – die hier untersuchten mathematischen Textaufgaben von voraussetzungsarmen Aufgaben, bei denen sich Sequenzeffekte als Folge eines überwiegend automatischen Transfers ergeben.

Leistungsvorteile einer günstigen Präsentationssequenz voraussetzungsreicher Aufgaben gegenüber einer ungünstigen Sequenz sollten nach diesen Überlegungen nicht beobachtbar sein, wenn die beiden Präsentationsreihenfolgen unter Bedingungen verglichen werden, die einen spontanen Transfer voraussetzen. Dieser Annahme wurde in Experiment 5 nachgegangen.

7.2 Experiment 5: Sequenzeffekte bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben in vorgegebenen Reihenfolgen

In diesem Experiment sollte geprüft werden, inwieweit Sequenzeffekte auch bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge auftreten, wenn keine Sequenzierungsinstruktion und auch keine Möglichkeiten zum Vergleich der zu bearbeitenden Aufgaben gegeben werden. Im Unterschied zu Experiment 4 wurden die zu bearbeitenden Aufgaben daher in unveränderlichen Abfolgen dargeboten. Außerdem wurde kein Überblick über die Aufgaben präsentiert, so dass über die Bearbeitung einzelner Aufgaben hinausgehende Vergleichsprozesse erschwert bzw. unmöglich gemacht wurden. Das Bemerkens von Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben als Voraussetzung für einen analogen Transfer war dementsprechend nur bei der eigentlichen Bearbeitung

der Aufgaben möglich. Da zusätzlich ein erneutes Lesen bereits bearbeiteter Aufgabenstellungen unterbunden wurde, mussten diese Ähnlichkeitsbeurteilungen und die daraus resultierende mögliche Nutzung von bereits gelösten Aufgaben zum analogen Transfer auf der Basis – vermutlich unvollständiger – Gedächtnisrepräsentationen durchgeführt werden, die zu diesen Aufgaben gebildet wurden. Es wurde erwartet, dass es unter diesen Bedingungen nicht zu analogen Problemlöseprozessen kommt (Untersuchungshypothese 3), so dass die in Experiment 4 beobachteten Sequenzeffekte in Experiment 5 ausbleiben sollten.

Eine Bestätigung dieser Vermutung würde gleichzeitig eine Replikation des Befundmusters zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben bedeuten. Dort konnte bereits gezeigt werden, dass ein Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Aufgabenabfolge nur dann nachweisbar ist, wenn Problemlöser bereits über Wissen hinsichtlich struktureller Aufgabenähnlichkeiten verfügen. Dieses Wissen kam dabei in besseren Kategorisierungsleistungen der Problemlöser vor der eigentlichen Aufgabenbearbeitung zum Ausdruck. Es besteht die Annahme, dass eine Sequenzierungsinstruktion den Erwerb dieses Wissens fördern kann, indem sie nahe legt, die Aufgaben vor ihrer Bearbeitung hinsichtlich struktureller Ähnlichkeiten miteinander zu vergleichen. Daher sollten sich bei Wegfall der Sequenzierungsinstruktion Leistungsunterschiede zwischen den in Experiment 4 untersuchten Präsentationsreihenfolgen deutlich vermindern bzw. wegfallen.

In Experiment 5 wird zusätzlich der Frage nachgegangen, ob ein Wegfall der Sequenzierungsinstruktion möglicherweise nur für Versuchspersonen mit niedrigem domänenspezifischem Vorwissen zu einem Ausbleiben von Sequenzeffekten führt. Es könnte nämlich sein, dass Versuchspersonen mit hohem Vorwissen über hinreichend Kenntnisse verfügen, so dass sie mögliche strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den Aufgaben auch ohne diese Unterstützungsmaßnahme erkennen und nutzen können. Nach diesen Ausführungen wäre eine Interaktion zwischen dem Vorwissen der Versuchspersonen und der Präsentationssequenz der Aufgaben zu erwarten und zwar derart, dass die in Experiment 4 beobachteten Sequenzeffekte nur für Versuchspersonen mit geringem Vorwissen wegfallen, während sie für Personen mit hohem Vorwissen nach wie vor bestehen (Untersuchungshypothese 6). Gleichzeitig kann die gegensätzliche Erwartung formuliert werden, dass Versuchspersonen mit hohem Vorwissen generell nicht von einer günstigen Aufgabenanordnung profitieren, da sie für Lern- und Transferprozesse ungeeignete Sequenzen anderweitig kompen-

sieren können (Untersuchungshypothese 7). In diesem Fall sollte auch für diese Personengruppe kein Sequenzeffekt nachweisbar sein.

Method

Versuchspersonen. Bei den untersuchten Versuchspersonen handelte es sich um 78 Studierende (48 weiblich, 30 männlich) verschiedener Fachbereiche der Georg-August-Universität Göttingen mit Deutsch als Muttersprache. Die Versuchspersonen waren im Alter von 19 bis 37 Jahren (Durchschnittsalter: 24,10 Jahre). Für die Teilnahme an der Untersuchung erhielten sie entweder ein bis zwei Versuchspersonenstunden oder eine finanzielle Entschädigung.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. Das für Experiment 4 verwendete Versuchsmaterial und die Versuchsdurchführung waren identisch mit der Vorgehensweise des ersten Experiments. Lediglich die Klausurphase von HYPERCOMB wurde verändert, um eine Untersuchung der oben beschriebenen Fragestellung zu ermöglichen.

Die Versuchsperson musste zunächst den Fragebogen zur Erfassung konzeptuellen Wissens zum Thema Kombinatorik ausfüllen. Nach der allgemeinen Einführung in HYPERCOMB und in die Untersuchungsdomäne erhielt sie die Gelegenheit, jeweils zwei ausgearbeitete Beispiele zu jeder der sechs vermittelten Aufgabenkategorien zu studieren, wobei jeweils eines der Beispiele einen Standardfall illustrierte, während das zweite Beispiel die zweifache Verwendung des jeweiligen Lösungsprinzips verdeutlichte (Spezialfall). Nach Beendigung dieser beispielbasierten Lernphase gelangte die Versuchsperson auf die Startseite der Klausurphase, auf der sie informiert wurde, dass sie sechs Klausuraufgaben in einer vorgegebenen Abfolge zu bearbeiten habe und dass die Klausur durch Betätigung des „Weiter“-Buttons am Ende der Seite begonnen werden könne. Es wurde ihr weiterhin mitgeteilt, dass eine Rückkehr zu vorangegangenen Aufgaben nicht möglich sei. Im Gegensatz zu Experiment 4 erfolgte auf der Klausureingangseite keine überblicksartige Auflistung aller Testaufgaben. In der Navigationsleiste am linken Bildschirmrand waren die Aufgaben durch Buttons gemäß der durch die Experimentalbedingung definierten Reihenfolge repräsentiert. Allerdings hatten diese Buttons keine Hyperlink-Funktion, erlaubten also keinen Abruf der jeweiligen Aufgabenstellung, sondern dienten lediglich als Auflistung der zu bearbeitenden Aufgaben.

Sobald die Versuchsperson den „Weiter-Button“ am Ende dieser Startseite betätigte, wurde die erste Aufgabe der jeweiligen Präsentationsreihenfolge automatisch präsentiert. Die Versuchsperson erhielt vor dieser durch das System realisierten automatischen Darbietung der Aufgabe keine Gelegenheit, die Aufgabenstellung zu lesen. Ein Link auf der Aufgabenseite führte zu dem entsprechenden Lösungsformular, auf dem die Versuchsperson ihre Antwort eingeben konnte. Nach dem Abschicken der Lösung an den Server wurde automatisch die nächste Aufgabe dargeboten. Die Navigationsleiste mit der Auflistung der zu bearbeitenden Aufgaben (Buttons) war während der gesamten Klausurbearbeitung sichtbar. Wurde eine Aufgabe bearbeitet und deren Lösung abgeschickt, so änderte der entsprechende Button seine Farbe, um zu signalisieren, wie viele der Aufgaben schon gelöst wurden. Im Anschluss an die Bearbeitung aller sechs Testaufgaben wurde automatisch eine Seite aufgerufen, die über das Ende der Problemlösephase informierte und die die Versuchsperson aufforderte, zum Abschluss den Nachtest zur Erfassung konzeptuellen Wissens auszufüllen.

Versuchsdesign. Als erste unabhängige Variable wurde die *Präsentationssequenz* der zu lösenden sechs Kombinatorikaufgaben interindividuell variiert, indem die Aufgaben entweder in der günstigen Sequenz (Permutation, Variation, Kombination; aufsteigende Komplexitätsabfolge innerhalb der Aufgabenkategorien) oder in der ungünstigen Sequenz aus Experiment 4 (Kombination, Permutation, Variation; absteigende Komplexitätsabfolge innerhalb der Aufgabenkategorien) präsentiert wurden. Die Präsentationssequenzen waren in dem vorliegenden Experiment mit der Bearbeitungsreihenfolge identisch, da die Versuchspersonen nicht von der vorgegebenen Aufgabenabfolge abweichen konnten. Als zweite unabhängige Variable fungierte das *domänenspezifische Vorwissen*. Die Versuchspersonen wurden anhand ihrer Leistungen im Vorwissenstest in eine Gruppe mit niedrigem und in eine Gruppe mit hohem Vorwissen eingeteilt. Diese Mediansplits wurden für beide Sequenzbedingungen separat durchgeführt.

Es resultierte ein vollständig gekreuztes 2x2-Design mit den Faktoren Präsentationssequenz (günstig/ungünstig) und Vorwissen (hoch/niedrig). Die Versuchspersonen wurden den Präsentationssequenzen zufällig zugewiesen.

Abhängige Variablen. Als abhängige Variablen fungierten die *Problemlöseperformance bei der Aufgabenbearbeitung* (insgesamt sowie getrennt nach der Performanz

bei der Bearbeitung einfacher und komplexer Aufgaben), die *Verweildauer in der Testphase* in Sekunden, sowie der *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest*. Die Kodierung der Antworten wurde nach dem in Experiment 4 verwendeten Bewertungsschema vorgenommen. Zusätzlich zu diesen Performanzmaßen wurden verschiedene demografische Daten sowie Zeitdaten zum Lernverhalten der Versuchsperson registriert.

Ergebnisse

Überprüfung der Vergleichbarkeit der Eingangsvoraussetzungen. In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe zweier ANOVAS (Präsentationssequenz \times Vorwissen) überprüft, ob die Versuchspersonen in den Experimentalbedingungen hinsichtlich ihres Vorwissens sowie hinsichtlich der auf den Lernbeispielen verbrachten Zeit vergleichbare Werte erbracht hatten (Tabelle 26). Für den *Prozentsatz richtiger Antworten im Vorwissenstest* ergab sich erwartungsgemäß ein hochsignifikanter Unterschied zwischen den Vorwissensbedingungen ($F(1,73) = 107,56$; $MSE = 120,10$; $p < .001$), während keine Unterschiede zwischen den beiden Sequenzbedingungen und keine Interaktion vorlagen (beide $F < 1$). Für die *Beispielzeit* ließ sich weder ein Effekt des Vorwissens noch eine Interaktion des Vorwissens mit der Präsentationssequenz nachweisen (beide $F < 1$), auch der Haupteffekt für den Faktor Präsentationssequenz verfehlte die Signifikanzgrenze ($F(1,73) = 2,49$; $MSE = 155590,10$; $p > .10$). Mittelwertsunterschiede zwischen den beiden Sequenzbedingungen bestanden dahingehend, dass Versuchspersonen in den Bedingungen mit günstiger Präsentationssequenz sich länger mit den Lernbeispielen beschäftigt hatten als Versuchspersonen in den Bedingungen mit ungünstiger Präsentationssequenz. Diese mögliche Konfundierung ist jedoch unbedenklich, da sie sogar zu einer strengeren Testung der Hypothese führt, dass es *nicht* zu Leistungsvorteilen durch eine günstige Präsentationssequenz kommen wird. Ebenso wie in Experiment 4 erwies sich auch in dem vorliegenden Experiment die Verweildauer auf den Lernbeispielen als bedeutsamer Prädiktor für den Gesamtproblemlöseerfolg ($r = .42$; $p < .001$; $N = 78$). Die Beispielzeit wurde daher ebenso wie in Experiment 4 als Kovariate in den nachfolgenden Analysen verwendet.

Effekte der Präsentationssequenz und des Vorwissens. Eine ANCOVA (Präsentationssequenz \times Vorwissen; Kovariate: Beispielzeit) für die *Problemlöseperformanz*

bei der Aufgabenbearbeitung (Tabelle 26) ergab erwartungsgemäß keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den Sequenzbedingungen ($F < 1$). Allerdings war ein Effekt des Vorwissens nachweisbar – Versuchspersonen mit hohem Vorwissen zeigten eine höhere Bearbeitungsleistung als solche mit niedrigerem Vorwissen ($F(1,73) = 4,88$; $MSE = 213,36$; $p < .05$). Es ergab sich keine Interaktion beider Faktoren ($F < 1$). Die Kovariate Beispielzeit erwies sich als hoch bedeutsam für den Problemlöseerfolg ($F(1,73) = 16,38$; $MSE = 213,36$; $p < .001$).

Eine getrennte Analyse für die beiden Aufgabenarten ergab für die *Performanz bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben* weder statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen den Sequenzbedingungen ($F < 1$), zwischen den Vorwissensbedingungen ($F(1,73) = 1,04$; $MSE = 258,55$; $p > .30$) noch eine Interaktion ($F < 1$). Allerdings zeigte sich auch hier ein deutlicher Einfluss der Kovariate ($F(1,73) = 7,48$; $MSE = 258,55$; $p < .01$).

Tabelle 26: Performanz (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz und des domänenspezifischen Vorwissens

	Günstige Sequenz		Ungünstige Sequenz	
	<i>Hohes Vorwissen</i> ($n = 19$)	<i>Niedriges Vorwissen</i> ($n = 19$)	<i>Hohes Vorwissen</i> ($n = 20$)	<i>Niedriges Vorwissen</i> ($n = 20$)
Vorwissen	53,21	25,32	52,75	29,15
Beispielzeit	722	678	539	579
Gesamtleistung	74,02	64,67	70,88	65,56
- Einfache Aufgaben	83,92	78,66	84,17	81,94
- Komplexe Aufgaben	64,13	50,68	57,59	49,17
Verweildauer (Testphase)	1085	991	929	901
Wissenstest	73,68	61,05	74,50	70,50

Die Durchführung der gleichen ANCOVA für die *Performanz bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben* erbrachte lediglich einen signifikanten Haupteffekt für den Vorwissensfaktor ($F(1,73) = 7,20$; $MSE = 321,39$; $p < .01$), während sich die Resultate der übrigen Vergleiche als statistisch nicht bedeutsam erwiesen ($F < 1$). Die Kovariate Beispielzeit erwies sich ebenso wie in den vorangegangenen Analysen als prädiktiv für die Performanz ($F(1,73) = 17,16$; $MSE = 321,39$; $p < .001$). Entsprechend der

zuvor formulierten Erwartung konnte folglich für fest vorgegebene Bearbeitungsreihenfolgen, bei denen Versuchspersonen nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten des Aufgabenvergleichs zur Verfügung stehen, kein Sequenzeffekt hinsichtlich der Problemlöseperformanz festgestellt werden.

Die Präsentationssequenz hatte darüber hinaus keinen Einfluss auf die *Verweildauer in der Testphase* ($F(1,73) = 2,16$; $MSE = 63901,78$; $p > .10$). Für diese Variable erwies sich auch das Vorwissen als bedeutungslos, zusätzlich konnte keine Interaktion zwischen den beiden Faktoren nachgewiesen werden (beide $F < 1$). Der Einfluss der Kovariate Beispielzeit war dagegen hoch bedeutsam ($F(1,73) = 12,70$ $MSE = 63901,78$; $p = .001$).

Hinsichtlich des *Prozentsatzes korrekter Antworten im Wissenstest* konnte lediglich erneut gezeigt werden, dass Versuchspersonen mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen auch am Ende des Experiments noch geringere Kenntnisse aufwiesen als solche Versuchspersonen, die bereits zu Beginn des Experiments über hohes Vorwissen verfügten. Dieser Effekt des Vorwissensfaktors war allerdings nur schwach ausgeprägt ($F(1,73) = 2,98$; $MSE = 449,60$; $p < .10$). Es ergab sich kein Effekt der Präsentationssequenz ($F(1,73) = 2,30$; $MSE = 449,60$; $p > .10$) und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F < 1$). Ein statistisch bedeutsamer Einfluss war nur für die Kovariate nachweisbar ($F(1,73) = 6,65$; $MSE = 449,60$; $p < .05$).

Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Experiment, bei dem die Testaufgaben in einer fest vorgegebenen Reihenfolge bearbeitet werden mussten, konnte erwartungsgemäß für keines der verwendeten Leistungsmaße ein Vorteil der günstigen Präsentationssequenz gegenüber der bereits in Experiment 4 verwendeten ungünstigen Sequenz nachgewiesen werden. Diese Befunde sprechen für die Untersuchungshypothese 3 und liefern gleichzeitig eine Replikation entscheidender Ergebnisse aus der ersten Experimentalserie. Ähnlich wie in Experiment 4 konnte keine Moderation potenzieller Sequenzeffekte durch das domänenspezifische Vorwissen nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis wird in Kapitel 8 ausführlich diskutiert.

Sequenzeffekte, die auf einem Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben basieren, hängen nach den Befunden der ersten und auch der zweiten Experimentalserie zu einem wesentlichen Anteil davon ab, ob sich ein Problemlöser der zwischen aufeinander folgenden Aufgaben bestehenden strukturellen Ähnlichkeit

bewusst ist und ob es ihm dann gelingt, diese lösungsrelevanten Ähnlichkeiten zur Bearbeitung nachfolgender Aufgaben zu nutzen. Diese Ergebnisse liefern eine entscheidende Bestätigung des in Abschnitt 3.3 vorgestellten Rahmenmodells. Die Wahrnehmung und Nutzung struktureller Ähnlichkeiten erfolgt vermutlich nicht im Sinne eines spontanen Transfers, sondern verlangt metakognitive Prozesse, die deliberativ angestoßen werden müssen. Durch die in Experiment 5 verwendete Art der Aufgabenpräsentation, bei der die Aufgaben einzeln, in fester Reihenfolge und ohne Möglichkeit zu einem Aufgabenvergleich vorgegeben wurden, wurden diese Prozesse eher behindert, während die in Experiment 4 eingesetzte Sequenzierungsinstruktion sowie die dort vorhandene Möglichkeit, auf der Übersichtsseite Aufgabenvergleiche anzustellen, diese Prozesse eher unterstützt haben dürfte und damit vermutlich zur Entstehung von Sequenzeffekten entscheidend beitrug.

Beide Aspekte, die Experiment 5 von Experiment 4 unterscheiden, nämlich einerseits die Möglichkeit, Aufgaben vor ihrer Bearbeitung miteinander zu vergleichen und andererseits die Option, eine eigene Bearbeitungssequenz festzulegen, könnten zum Einsatz entsprechender metakognitiver Prozesse geführt haben. Um Aufschluss darüber zu gewinnen, welcher dieser beiden Faktoren primär für die Entstehung von Sequenzeffekten verantwortlich ist, wurde ein drittes Experiment durchgeführt, bei dem zunächst in allen Bedingungen Aufgabenvergleiche durch eine Zusatzaufgabe angeregt wurden, bevor die eigentliche Aufgabenbearbeitung einsetzte. In Experiment 6 wurden sowohl Bedingungen mit vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge als auch Bedingungen mit der Möglichkeit zur eigenständigen Aufgabensequenzierung realisiert.

7.3 Experiment 6: Moderation von Sequenz- und Sequenzierungseffekten durch Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten

In Experiment 6 wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Sequenz- und Sequenzierungseffekte durch einen instruierten Vergleich der Aufgaben hinsichtlich ihrer lösungsrelevanten Eigenschaften moderiert werden. Diese Frage ergab sich aus einem Vergleich der Ergebnisse der beiden ersten Experimente. In Experiment 4 konnte gezeigt werden, dass eine günstige Sequenz gegenüber einer ungünstigen Sequenz zu besseren Leistungen führte, wenn gleichzeitig eine Instruktion zur Sequen-

zierung der Aufgaben gegeben wurde. Diese Unterschiede zwischen den beiden Sequenzen waren hingegen nicht mehr nachweisbar, wenn die Bearbeitungsreihenfolge fest vorgegeben war (Experiment 5).

Offen bleibt bei dem Vergleich von Experiment 4 und Experiment 5 jedoch die Frage, ob diese Unterschiede hinsichtlich des Auftretens von Sequenzeffekten nicht vorwiegend dadurch zustande kommen, dass in Experiment 4 gleichzeitig zum Vorliegen einer Sequenzierungsinstruktion auch die Möglichkeit gegeben war, die zu bearbeitenden Aufgaben miteinander zu vergleichen, während Aufgabenvergleiche in Experiment 5 deutlich erschwert waren, da den Versuchspersonen zu keinem Zeitpunkt der Experimentaldurchführung alle Aufgaben gleichzeitig zur Verarbeitung zur Verfügung standen.

Sollten die in Experiment 4 gefundenen Sequenzeffekte vor allem durch die dort vorhandenen Möglichkeiten zum Aufgabenvergleich verursacht gewesen sein, so sollten Sequenzeffekte auch dann nachweisbar sein, wenn die Aufgaben zwar in einer fest vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge gelöst werden müssen, wenn aber trotzdem Aufgabenvergleiche ermöglicht und angeregt werden. Um dieser Frage nachzugehen, wurden die beiden festen Bearbeitungsabfolgen der Aufgaben aus Experiment 5 repliziert, wobei die Versuchspersonen jedoch vor der eigentlichen Bearbeitung der Aufgaben aufgefordert wurden, diese paarweise miteinander zu vergleichen und für jedes Aufgabenpaar zu beurteilen, inwieweit die Lösung der jeweils ersten Aufgabe helfen würde, die zweite Aufgabe zu lösen. Erst im Anschluss an diese Beurteilungsaufgabe mussten die Testaufgaben in einer der fest vorgegebenen Bearbeitungssequenzen gelöst werden.

Sollte sich unter diesen Bedingungen eine Überlegenheit der günstigen Aufgabensequenz gegenüber der ungünstigen Sequenz ergeben, so würde dies dafür sprechen, dass im Wesentlichen die Möglichkeit zum Aufgabenvergleich und dessen Förderung durch eine Sequenzierungsinstruktion den in Experiment 4 gefundenen Sequenzeffekt bedingt hat. Damit hätte die Sequenzierungsinstruktion einen relativ unspezifischen Effekt, der auch durch andere Maßnahmen, die ebenfalls einen Aufgabenvergleich anregen, erzeugt werden kann. Alternativ könnte es sich jedoch auch zeigen, dass eine Sequenzierungsinstruktion eine spezifischere Wirkung hat, die mit anderen Maßnahmen zur Förderung von Aufgabenvergleichen möglicherweise nicht erreicht werden kann. Diese Interpretation würde dann gestützt werden, wenn sich auch beim Einsatz einer vorgeschalteten Vergleichsaufgabe keinerlei Performanz-

unterschiede zwischen den beiden fest vorgegebenen Bearbeitungssequenzen ergäben.

Dieses zuletzt beschriebene Befundmuster würde gleichzeitig eine Replikation der Ergebnisse von Experiment 3 zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben nach sich ziehen. Dort ergaben sich auf der Ebene der Haupteffekte keine Performanzvorteile zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz, wenn vor der eigentlichen Aufgabenbearbeitung eine Aufgabenkategorisierung vorgenommen werden musste. Ein Sequenzeffekt zeigte sich dagegen ausschließlich für Versuchspersonen, die gute Kategorisierungsleistungen erbracht hatten und die damit über Wissen hinsichtlich der Strukturmerkmale der Aufgaben verfügten.

Zusätzlich zu den beiden bereits beschriebenen Experimentalbedingungen wurde in Experiment 6 eine dritte Bedingung mit freier Wahl der Bearbeitungsreihenfolge realisiert, in der ebenfalls zunächst vor der Aufgabenbearbeitung die Beurteilungsaufgabe ausgeführt werden musste. Im Anschluss wurden die Aufgaben wie in Experiment 4 in einem Überblick präsentiert und konnten dann in jeder beliebigen Reihenfolge bearbeitet werden, d.h. es bestand die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung. Auf der Überblicksseite wurden die Aufgaben in der bereits in Experiment 4 und 5 verwendeten ungünstigen Sequenz präsentiert. Die Einführung der dritten Versuchsbedingung ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen der ungünstigen Sequenz mit fester Bearbeitungsreihenfolge und der gleichen Sequenz mit der Option zur eigenständigen Aufgabensequenzierung. Dieser Vergleich erlaubt Aussagen über den spezifischen Nutzen einer Sequenzierungsinstruktion zur Verbesserung der Performanz, da der unspezifische Beitrag von Aufgabenvergleichen in beiden Bedingungen ähnlich sein sollte. Performanzunterschiede zwischen diesen beiden Bedingungen sollten sich daher nur dann ergeben, wenn die Möglichkeit zur Sequenzierung einen über Aufgabenvergleiche hinausgehenden spezifischen Einfluss auf die Leistung hat.

Insgesamt wurde in Experiment 6 in Abhängigkeit von dem zugrunde liegenden Wirkmechanismus also folgendes Ergebnismuster erwartet:

- Wenn die Sequenzierungsinstruktion eine unspezifische Wirkung hat, indem lediglich Aufgabenvergleiche gefördert werden, dann sollte jede andere Maßnahme, die dies ebenfalls ermöglicht, den gleichen Effekt haben. Das heißt, eine Beurteilungsaufgabe, mit der Aufgabenvergleiche gefördert werden, sollte dazu führen, dass es erstens auch bei einer fest vorgegebenen Bearbeitungs-

sequenz zu einem Performanzvorteil der günstigen Sequenz kommt. Zweitens sollte sich keine weitere Verbesserung der Bearbeitungsleistung durch die zusätzliche Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung ergeben.

- Hat die Sequenzierungsinstruktion jedoch einen spezifischen Effekt, der über die Förderung von Aufgabenvergleichen hinausgeht und der für das Entstehen von Sequenzeffekten entscheidend ist, dann ist für den Vergleich der Bedingungen mit fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge ähnlich wie in Experiment 3 nach wie vor kein Sequenzeffekt zu erwarten. Dagegen sollte die in der dritten Bedingung realisierte Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung einen Leistungsvorteil gegenüber einer fest vorgegebenen Bearbeitungssequenz erbringen.

Experiment 6 beschäftigt sich diesen Ausführungen zu Folge mit einer Ausdifferenzierung der Untersuchungshypothese 3, in dem der Frage nachgegangen wird, welche Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten eine Entstehung von Sequenzeffekten begünstigen können.

Methode

Versuchspersonen. Bei den untersuchten Versuchspersonen handelte es sich um 42 Studierende (32 weiblich, 10 männlich) verschiedener Fachbereiche der Universität des Saarlandes mit Deutsch als Muttersprache. Die Versuchspersonen waren im Alter von 19 bis 45 Jahren (Durchschnittsalter: 23,45 Jahre). Für die Teilnahme an der Untersuchung erhielten sie entweder zwei Versuchspersonenstunden oder eine finanzielle Entschädigung.

Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung. In Experiment 6 wurde das gleiche Versuchsmaterial wie in den beiden vorangegangenen Experimenten verwendet. Nach dem Ausfüllen des domänenspezifischen Vorwissenstests, dem Lesen der allgemeinen Einführung in HYPERCOMB und in die Untersuchungsdomäne erhielten die Versuchspersonen die Gelegenheit, sich anhand von jeweils zwei ausgearbeiteten Beispielen mit jeder der sechs Aufgabenkategorien vertraut zu machen, wobei sowohl Standardfälle als auch Spezialfälle der Anwendung des jeweiligen Lösungsprinzips illustriert wurden. Hatte sich die Versuchsperson entschieden, die beispielbasierte Lernphase zu beenden, wurde sie bei Anklicken des "Klausur"-Links zunächst aufgefordert, sich an ihre Versuchsleiterin zu wenden, um weitere Instruktionen zu er-

halten. Diese händigte darauf hin die Materialien für die Vergleichsaufgabe aus, die nicht am Computer durchgeführt wurde.

Die Versuchsperson erhielt die Instruktion, für mehrere Aufgabenpaare aus der Kombinatorik zu beurteilen, inwieweit die Kenntnis der Lösung der jeweils ersten Aufgabe eines Aufgabenpaares für die Lösung der jeweils zweiten Aufgabe nützlich sein würde. Diese Nützlichkeits einschätzung sollte für jedes Aufgabenpaar auf einer Skala von 0 (überhaupt nicht nützlich) bis 100 (sehr nützlich) angegeben werden. Die 15 zu beurteilenden Aufgabenpaare wurden aus den sechs Klausuraufgaben gebildet (vollständiger Paarvergleich: $n(n-1)/2 = 15$ mögliche Aufgabenpaare). Die gleichen 15 Paare wurden zweimal dargeboten, wobei die Aufgabenabfolge innerhalb jedes Paarlings variiert wurde. Insgesamt mussten daher für 30 Aufgabenpaare Einschätzungen abgegeben werden.

Im Anschluss an diese Beurteilungsaufgabe, deren Konstruktion in Anlehnung an ein bei Reed (1987) beschriebenes Vorgehen erfolgte, mussten die Versuchspersonen die Problemlösephase von HYPERCOMB absolvieren. Dabei wurden die zu bearbeitenden Aufgaben in Abhängigkeit von der realisierten Experimentalbedingung in verschiedenen Präsentationsreihenfolgen dargeboten, die entweder zur Bearbeitung beibehalten werden mussten oder aber verändert werden konnten. Die Aufgabenpräsentation erfolgte – je nachdem, ob die Möglichkeit zur Sequenzierung gegeben wurde oder nicht – entweder sequenziell und ohne einen Überblick über die zu bearbeitenden Aufgaben (d.h. wie in Experiment 5), oder es wurde ein Aufgabenüberblick geboten, und die Versuchspersonen konnten ausgehend von dieser Überblicksseite wählen, welche Aufgabe sie zu einem bestimmten Zeitpunkt bearbeiten wollten (d.h. wie in Experiment 4). Den Abschluss des Experiments bildete die Bearbeitung des Wissenstests zur Erfassung konzeptueller Kenntnisse in der Domäne.

Versuchsdesign. In Experiment 6 wurde auf Grund der spezifischen Vorhersagen auf einen vollständig gekreuzten Versuchsplan verzichtet. Stattdessen wurden nur drei der vier Experimentalbedingungen realisiert, die sich aus der Kombination der beiden unabhängigen Variablen *Präsentationssequenz der Testaufgaben* und *Möglichkeit zur Sequenzierung* ergaben. Aus ökonomischen Gründen wurde das domänenspezifischen Vorwissen der Versuchspersonen nicht als dritte unabhängige Variable in das Design aufgenommen, zumal sich diese Variable in den vorangegangenen beiden Experimenten nicht als besonders einflussreich erwiesen hatte. In der

ersten Bedingung wurden die Testaufgaben im Anschluss an die Beurteilungsaufgabe in der günstigen Sequenz (Permutation, Variation, Kombination; aufsteigende Komplexitätsabfolge innerhalb jeder Aufgabenkategorie) dargeboten und mussten auch in dieser Sequenz bearbeitet werden, so dass keine Möglichkeit zur Sequenzierung bestand. In der zweiten Bedingung wurden die Testaufgaben in der in Experiment 4 und 5 verwendeten ungünstigen Sequenz präsentiert und mussten auch in dieser Sequenz bearbeitet werden (Kombination, Permutation, Variation; absteigende Komplexitätsabfolge innerhalb jeder Aufgabenkategorie). In der dritten Bedingung wurden die Aufgaben ebenfalls in der ungünstigen Sequenz präsentiert. Zusätzlich wurden die Versuchspersonen hier instruiert, dass sie die Aufgaben in jeder beliebigen Reihenfolge bearbeiten könnten (Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung).

Abhängige Variablen. Als abhängige Variablen fungierten die *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung* (insgesamt sowie getrennt nach der Performanz bei der Bearbeitung einfacher und komplexer Aufgaben), die *Verweildauer in der Testphase* in Sekunden, sowie der *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest*. Die Kodierung der Antworten wurde nach dem in Experiment 4 und 5 verwendeten Bewertungsschema vorgenommen. Neben diesen Performanzmaßen wurden verschiedene demografische Daten sowie Zeitdaten zum Lernverhalten der Versuchsperson registriert.

Darüber hinaus wurde in den Bedingungen mit fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge die *Qualität der Nützlichkeitsbeurteilung* registriert, indem aus den Einschätzungen der Versuchspersonen aus der Beurteilungsaufgabe zunächst zwei Maße abgeleitet wurden: Erstens wurde bestimmt, ob die Versuchspersonen strukturelle Ähnlichkeiten zwischen einfachen und komplexen Aufgaben jeweils einer Aufgabenkategorie erkannt hatten, indem die Nützlichkeitseinschätzungen für die entsprechenden Aufgabenpaarlinge aufsummiert und gemittelt wurden. Höhere Werte indizierten dabei eine größere Nützlichkeit der einen Aufgabe zur Lösung der anderen Aufgabe. Einfache und komplexe Aufgaben einer Aufgabenkategorie waren hinsichtlich ihrer Strukturmerkmale identisch, so dass die Nützlichkeitsbeurteilung für diese insgesamt sechs der 30 Aufgabenpaare sehr hoch ausfallen sollte.

Im Gegensatz dazu wurden in dem zweiten Maß diejenigen Aufgabenpaare betrachtet, die sich aus maximal unterschiedlichen Aufgaben zusammensetzten. Maximale strukturelle Abweichungen lagen z.B. zwischen einfachen Permutationsaufga-

ben und komplexen Kombinationsaufgaben vor, da diese Aufgaben sich nach den eingangs vorgestellten aufgabenanalytischen Überlegungen maximal hinsichtlich des Lösungsprinzips (Permutation vs. Kombination) und bezüglich der Frage 'Standardfall versus Spezialfall' unterschieden. Insgesamt gab es acht der 30 Aufgabenpaare, die hinsichtlich dieser beiden Aspekte differierten. Die mittleren Nützlichkeitsbeurteilungen für diese Aufgabenpaare sollten möglichst niedrig ausfallen, da es sich um strukturell stark voneinander abweichende Aufgaben handelt.

Die Mittelwerte aus beiden Maßen wurden an der jeweiligen Anzahl der entweder strukturell identischen oder aber maximal strukturell unähnlichen Aufgabenpaare relativiert (sechs bzw. acht Aufgabenpaare), und schließlich wurde die Differenz zwischen beiden Maßen gebildet, indem von den Nützlichkeitsbeurteilungen für strukturell identische Aufgaben (erstes Maß) die Nützlichkeitsbeurteilungen für strukturell unähnliche Aufgaben (zweites Maß) subtrahiert wurden. Die Qualität der Nützlichkeits einschätzungen ist hoch, wenn dieses Differenzmaß hohe numerische Werte annimmt. In diesem Fall können Problemlöser sowohl die Nützlichkeit strukturell identischer Aufgaben für die Aufgabenbearbeitung erkennen als auch gleichzeitig korrekt angeben, dass strukturell unähnliche Aufgaben nur eine geringe Nützlichkeit für die Aufgabenbearbeitung aufweisen. Niedrige numerische Werte für das Differenzmaß indizieren dagegen, dass Problemlöser zwischen diesen beiden Arten von Aufgabenpaaren bei der Beurteilung der relativen Nützlichkeit der Aufgaben für die Bearbeitung nicht unterscheiden.

Ergebnisse

Der Vergleich der drei Experimentalbedingungen erfolgte entsprechend der spezifischen Vorhersagen in mehreren Schritten. In einem ersten Schritt wurden die beiden Bedingungen mit fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge und variierender Präsentationssequenz im Hinblick auf mögliche Sequenzeffekte miteinander verglichen. In einem zweiten Schritt wurden die beiden Bedingungen mit ungünstiger Präsentationssequenz analysiert, die sich bezüglich der Frage unterschieden, ob ein Abweichen von dieser Präsentationssequenz möglich war. Dieser Vergleich sollte es erlauben, vermutete spezifische Effekte der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung aufzudecken. Schließlich wurde in einem dritten Schritt die Bedingung mit Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung näher im Hinblick auf das dort von Versuchspersonen gezeigte Sequenzierungsverhalten und dessen Auswirkungen auf die Problemlöse-

performanz analysiert. Da im vorliegenden Experiment spezifische Vorhersagen für den Vergleich von jeweils zwei Gruppen überprüft wurden, wurden für alle statistischen Analysen zweiseitige t-Tests für unabhängige Stichproben eingesetzt.

Sequenzeffekte bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge. In einem ersten Schritt wurde zunächst die Vergleichbarkeit der beiden Sequenzbedingungen bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge hinsichtlich verschiedener Eingangsvoraussetzungen überprüft (Tabelle 27). Es ergaben sich keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den Sequenzbedingungen bezüglich des Vorwissens ($t(26) = 1,44; p > .15$), bezüglich der Beispielzeit ($t(26) = -1,07; p > .25$) oder der Qualität der Nützlichkeitsbeurteilungen ($t(26) = -1,21; p > .20$).

Tabelle 27: Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Präsentationssequenz (bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge)

	Günstige Sequenz (n = 14)	Ungünstige Sequenz (n = 14)
Vorwissen	51,86 (13,75)	44,29 (14,02)
Beispielzeit	697 (572)	902 (427)
Nützlichkeitsbeurteilung	5,87 (22,81)	16,25 (22,49)
Gesamtperformanz	64,59 (11,17)	65,43 (16,13)
- Einfache Aufgaben	84,30 (13,70)	76,94 (17,65)
- Komplexe Aufgaben	44,89 (16,77)	53,92 (19,29)
Verweildauer (Testphase)	689 (161)	803 (218)
Wissenstest	71,43 (15,12)	70,71 (20,56)

Zur Beantwortung der Frage, ob die Entstehung von Sequenzeffekten bei fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge durch die vorherige Bearbeitung einer Ver-

gleichsaufgabe gefördert werden kann, wurden in einem nächsten Schritt die verschiedenen Performanz- und Zeitmaße analysiert. Bezüglich keines der in Tabelle 27 aufgeführten Maße ergaben sich statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen den Sequenzbedingungen, die für eine Überlegenheit der günstigen Präsentationssequenz als fest vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge sprachen. Die Ergebnisse der statistischen Analysen waren im Einzelnen: *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung*: $t(26) = 0,16$; $p > .80$; *Performanz bei der Bearbeitung leichter Aufgaben*: $t(26) = -1,23$; $p > .20$; *Performanz bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben*: $t(26) = 1,32$; $p > .15$; *Verweildauer in der Testphase*: $t(26) = -1,57$; $p > .10$ und *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest*: $t(26) = 0,10$; $p > .90$.

In diesen Vergleichen ergaben sich somit keine Hinweise darauf, dass eine Beurteilung der relativen Nützlichkeit von Aufgaben für die Lösung anderer Aufgaben im Sinne einer Vergleichsaufgabe geeignet ist, bei einer fest vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge die Entstehung eines Sequenzeffekts zu fördern. Es findet sich eine Replikation der Befunde von Experiment 3, in der sich eine auf Algebraaufgaben bezogene Kategorisierungsaufgabe ebenfalls als ungeeignet erwies, um die Entstehung von Sequenzeffekten zu unterstützen. Gleichzeitig validieren die Ergebnisse die Interpretation der Befunde von Experiment 4 und 5, wonach eine Sequenzierungsinstruktion – unter der ein Sequenzeffekt nachweisbar ist – spezifischere, für die Entstehung von Sequenzeffekten bedeutsame Wirkungen hat, die nicht mit dieser Vergleichsaufgabe erreicht werden können. Nach diesen Ergebnissen wäre zu erwarten, dass die weiteren Analysen einen Nachweis dieser spezifischen Wirkung erbringen, indem gezeigt werden kann, dass allein das Vorliegen der Sequenzierungsinstruktion zu einer Leistungsverbesserung führt.

Effekte der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung. Zunächst wurde die Vergleichbarkeit der beiden Experimentalbedingungen hinsichtlich verschiedener Eingangsvoraussetzungen überprüft (Tabelle 28). Die beiden Bedingungen, in denen die ungünstige Präsentationssequenz entweder als fest vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge vorgegeben wurde oder aber mit der Möglichkeit der Aufgabensequenzierung verbunden wurde, unterschieden sich nicht bezüglich des Vorwissens ($t(26) = 0,49$; $p > .60$), bezüglich der Beispielzeit ($t(26) = -1,04$; $p > .30$) oder der Qualität der Nützlichkeitsbeurteilungen ($t(26) = -0,44$; $p > .60$).

Zur Beantwortung der Frage, ob die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung einen spezifischen leistungsförderlichen Effekt hat, der nicht allein durch die damit einhergehende Gelegenheit zum Aufgabenvergleich erklärt werden kann, wurden die beiden Experimentalbedingungen hinsichtlich der in Tabelle 28 aufgeführten Performanz- und Zeitmaße miteinander verglichen.

Tabelle 28: Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung (bei ungünstiger Präsentationssequenz)

	Fest vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge (n = 14)	Mit der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung (n = 14)
Vorwissen	44,29 (14,02)	46,71 (12,00)
Beispielzeit	902 (427)	1090 (519)
Nützlichkeitsbeurteilung	16,25 (22,49)	20,06 (23,23)
Gesamtp Performanz	65,43 (16,13)	76,21 (10,33)
- Einfache Aufgaben	76,94 (17,65)	87,61 (11,82)
- Komplexe Aufgaben	53,92 (19,29)	64,81 (15,36)
Verweildauer (Testphase)	803 (218)	1143 (335)
Wissenstest	70,71 (20,56)	87,14 (16,84)

Problemlöser, denen die zu bearbeitenden Aufgaben in einer ungünstigen Sequenz präsentiert worden waren, zeigten eine bessere *Problemlöseperformanz bei der Aufgabenbearbeitung*, wenn sie dabei die Möglichkeit erhielten, von dieser Präsentationssequenz abzuweichen und eine andere Bearbeitungsreihenfolge zu wählen ($t(26) = -2,11$; $p < .05$). Dieser Effekt war tendenziell für die *Performanz bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben* ($t(26) = -1,88$; $p < .10$) nachweisbar, während er für die *Performanz bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben* die Signifikanzgrenze knapp verfehlte ($t(26) = -1,65$; $p > .10$). Die *Verweildauer in der Testphase* war durch die Mög-

lichkeit zur Aufgabensequenzierung gegenüber der Bedingung mit fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge deutlich verlängert ($t(26) = -3,18; p < .01$). Schließlich zeigten sich positive Effekte einer Sequenzierungsinstruktion im Hinblick auf den *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest* ($t(26) = -2,31; p < .05$).

Dieses Ergebnismuster brachte damit eine Bestätigung der Annahme, dass eine Sequenzierungsinstruktion Leistungsverbesserungen bewirkt, die nicht durch unspezifische Effekte der Möglichkeit zum Aufgabenvergleich erklärt werden können. Die Bedeutung dieser Ergebnisse für das integrative Modell zur Entstehung von Sequenzeffekten sowie für die in Kapitel 4 getroffenen Annahmen zur Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie werden im Zusammenhang mit den Befunden aus Experiment 4 und 5 in Abschnitt 7.4 erörtert. Zuvor soll jedoch die Bedingung mit Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung im Hinblick auf das dort von Versuchspersonen gezeigte Sequenzierungsverhalten und auf Effekte der Umsequenzierung von Aufgaben analysiert werden.

Sequenzierungsverhalten und dessen Auswirkungen. Von den 14 in der Experimentalbedingung mit Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung untersuchten Versuchspersonen nahmen genau 50 Prozent die Gelegenheit wahr und wichen von der ungünstigen Präsentationssequenz der Aufgaben ab. Performanz- und Zeitdaten dieser sieben Sequenzierer wurden mit den Daten der sieben Beibehalter verglichen, um Effekte des Sequenzierungsverhaltens abzuschätzen (Tabelle 29).

Tabelle 29: Mittelwerte (Streuungen) für Performanzdaten (in %) und Zeitdaten (in Sekunden) als Funktion des Sequenzierungsverhaltens (bei ungünstiger Präsentationssequenz)

	Beibehalter (n = 7)	Sequenzierer (n = 7)
Vorwissen	42,57 (12,10)	50,86 (11,20)
Beispielzeit	1235 (607)	944 (409)
Nützlichkeitsbeurteilung	12,80 (29,47)	27,32 (13,32)
Gesamtp Performanz	73,90 (9,36)	78,53 (11,44)
- Einfache Aufgaben	90,83 (7,23)	84,39 (15,04)
- Komplexe Aufgaben	56,97 (13,69)	72,66 (13,42)
Verweildauer (Testphase)	1021 (333)	1264 (313)
Wissenstest	91,43 (18,65)	82,86 (14,96)

Ein Vergleich der Beibehalter und der Sequenzierer im Hinblick auf die verschiedenen Performanz- und Zeitdaten mit Hilfe ungerichteter t-Tests für unabhängige Stichproben zeigte zunächst, dass sich die beiden Strategiegruppen hinsichtlich ihrer Eingangsvoraussetzungen nicht statistisch bedeutsam unterschieden (*Vorwissen*: $t(12) = -1,33$; $p > .20$; *Beispielzeit*: $t(12) = 1,06$; $p > .30$ und *Qualität der Nützlichkeitsbeurteilung*: $t(12) = -1,19$; $p > .25$). Mögliche Performanzvorteile, die mit einer Aufgabensequenzierung verbunden sein können, sind damit nicht dadurch erklärbar, dass Sequenzierer über bessere Voraussetzungen im Sinne eines höheren Vorwissens, adäquateren Lernverhaltens oder im Sinne ausgeprägterer Fähigkeiten zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben verfügen.

Weder für die *Problemlöseleistung bei der Aufgabenbearbeitung* insgesamt noch für die *Performanz bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben* ergaben sich Leistungsvorteile zu Gunsten der Aufgabensequenzierer (Gesamt: $t(12) = -0,83$; $p > .40$; einfache Aufgaben: $t(12) = 1,02$; $p > .30$). Allerdings zeigten Sequenzierer gegenüber Beibehaltern ähnlich wie in Experiment 4 eine höhere *Performanz bei der Bearbei-*

tung komplexer Aufgaben ($t(12) = -2,17; p = .05$). Für die *Verweildauer in der Testphase* und auch für den *Prozentsatz korrekter Antworten im Wissenstest* fanden sich dagegen keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen (*Verweildauer*: $t(12) = -1,41; p > .15$; *Wissenstest*: $t(12) = 0,95; p > .30$).

Zusammenfassung und Diskussion

Experiment 6 wurde durchgeführt um zu überprüfen, inwieweit das Vorliegen einer Sequenzierungsinstruktion spezifische Auswirkungen auf die Problemlöseperformanz hat, die nicht nur dadurch erklärt werden können, dass diese Instruktion Vergleiche der Aufgaben hinsichtlich ihrer lösungsrelevanten Merkmale ermöglicht und anregt. Das resultierende Ergebnismuster stützt die Annahme, dass es sich bei einer Sequenzierungsinstruktion um eine Maßnahme zur Förderung einer tiefer gehenden Aufgabenverarbeitung handelt, deren Wirkung über unspezifische Effekte eines Aufgabenvergleichs hinausgeht.

Hätte die Sequenzierungsinstruktion lediglich eine unspezifische Wirkung, dann wäre zu erwarten gewesen, dass die Vorgabe einer Beurteilungsaufgabe zur Förderung von Aufgabenvergleichen die gleichen Effekte wie eine Sequenzierungsinstruktion hervorbringt. Dies war jedoch nicht der Fall: Das Vorliegen einer Vergleichsaufgabe führte bezüglich keines der eingesetzten Maße zu einem Performanzvorteil der günstigen Sequenz bei einer fest vorgegebenen Bearbeitungssequenz, so dass es zu einer Replikation der Ergebnisse von Experiment 3 kam. Sequenzeffekte waren demnach ausschließlich in Experiment 4 beobachtbar, in dem gleichzeitig die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung gegeben war.

Die empirischen Ergebnisse von Experiment 6 stützen stattdessen die Annahme einer spezifischen Wirkung der Sequenzierungsinstruktion, indem nachgewiesen werden konnte, dass die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung – nicht aber die Möglichkeit zu einem allgemeinen Aufgabenvergleich – einen Leistungsvorteil gegenüber einer fest vorgegebenen Bearbeitungssequenz erbringt. Dieser Leistungsvorteil war sowohl für die Problemlöseperformanz als auch für die Performanz in dem anschließend an die Problemlösephase eingesetztem Wissenstest nachweisbar. Der letzte Befund kann dahingehend interpretiert werden, dass die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung auch den Erwerb konzeptuellen Wissens fördert, beispielsweise indem eine tiefer gehende Auseinandersetzung mit den Strukturmerkmalen angeregt wird.

7.4 Fazit zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung multipler Kombinatorikaufgaben

In Experiment 4 konnte ein Nachweis für die Existenz von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung von Textaufgaben in der Kombinatorik erbracht werden. Diese bestanden darin, dass eine Sequenz, in der die zu bearbeitenden Aufgaben entsprechend ihrer strukturellen Ähnlichkeit und nach ihrer Komplexität aufsteigend angeordnet waren, zu besseren Problemlöseleistungen – vor allem im Hinblick auf die Performanz bei der Bearbeitung einfacher Aufgaben – führte als eine ungünstige Kontrollsequenz, in der strukturell unähnliche Aufgaben aufeinander folgten und komplexe Aufgaben vor einfachen Aufgaben einer Aufgabenkategorie präsentiert wurden. Darüber hinaus wiesen Problemlöser im anschließenden Wissenstest höhere Kenntnisse bezüglich konzeptueller Inhalte (z.B. Bedeutung einzelner Strukturmerkmale, Unterschiede zwischen Aufgabenkategorien) auf. Wie in dem in Abschnitt 3.3 dargestellten integrativen Rahmenmodell angenommen, erweist sich damit eine Anordnung der Aufgaben entsprechend ihrer strukturellen Ähnlichkeit sowie entsprechend ihrer relativen Komplexität als bedeutsam für die Entstehung von Sequenzeffekten.

Auffallend ist es, dass das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen keinen Einfluss auf diese Effekte hatte, während aber umgekehrt eine Variation der Präsentationssequenzen der Testaufgaben durchaus Auswirkungen auf den Wissenserwerb hatte. Der zuletzt genannte Effekt kann dahingehend interpretiert werden, dass Vorteile einer Präsentationssequenz nicht dadurch begründet sein können, dass bei der Aufgabenbearbeitung Wissen erworben werden kann, welches zur Bearbeitung nachfolgender Aufgaben im Sinne eines analogen Transfers eingesetzt werden kann. Darüber hinaus kommt die Eignung bestimmter Aufgabensequenzen auch in einem resultierenden tiefer gehenden Verständnis für die Domänen zum Ausdruck, das seinerseits zu besseren Leistungen in entsprechenden Wissenstests oder – wie in der ersten Experimentalserie gezeigt – zu einer höheren Performanz bei der Bearbeitung von Transferaufgaben führt.

Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach struktureller Ähnlichkeit geblockten und in der Aufgabenkomplexität zunehmenden Präsentationssequenz traten jedoch nur unter der Bedingung auf, dass mit der Aufgabenbearbeitung eine Instruktion zur Sequenzierung der Aufgaben verbunden war und Versuchspersonen einen Überblick über die zu bearbeitenden Aufgaben erhielten. In Experiment 5, in dem die Aufgaben

sequentiell in einer fest vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge und ohne Überblick präsentiert wurden, konnte dagegen kein Performanzunterschied zwischen der a priori als günstig definierten Sequenz und der ungünstigen Sequenz nachgewiesen werden.

Experiment 6 wurde durchgeführt um herauszufinden, ob die in Experiment 4 eingesetzte Sequenzierungsinstruktion eine eher unspezifische Anregung von Aufgabenvergleichen bewirkt, die wiederum das Erkennen struktureller Ähnlichkeiten ermöglichen und damit die Grundlage für Transfer- und somit für Sequenzeffekte schaffen. In diesem Fall sollten andere Maßnahmen zur Unterstützung des Aufgabenvergleichs bzw. der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten ebenfalls die Entstehung von Sequenzeffekten fördern. Ein alternativer Erklärungsansatz besteht in der Annahme, dass die Sequenzierungsinstruktion und die dadurch angestoßenen metakognitiven Problemlöseprozesse eine spezifischere Wirkung haben, die über die Förderung von Aufgabenvergleichen hinausgeht. In diesem Fall sollte eine Instruktion zur Aufgabensequenzierung auch dann noch einen leistungsförderlichen Effekt haben, wenn bereits Vergleiche der Aufgaben hinsichtlich ihrer strukturellen Eigenschaften durchgeführt wurden. Die Ergebnisse von Experiment 6 unterstützen diese zweite Erklärung, indem sie zeigen, dass es gegenüber einer Bedingung mit fest vorgegebener Bearbeitungsreihenfolge zu Leistungsverbesserungen kommt, wenn Versuchspersonen die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung erhalten. Dieser Performanzunterschied zeigt sich, obwohl in beiden Bedingungen zusätzlich die Möglichkeit zum Aufgabenvergleich gegeben war.

Die Ergebnisse liefern damit zunächst weitere Evidenz für die im integrativen Rahmenmodell enthaltene Annahme, dass Sequenzeffekte bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben nicht ein – wie für voraussetzungsarme Aufgaben angenommen – Resultat weitestgehend automatischer Transferprozesse zwischen aufeinander folgenden Aufgaben darstellen, sondern dass sie von einem Erkennen der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgaben abhängen. Allerdings erweisen sich – wie der Vergleich von Experiment 6 und Experiment 4 zeigen kann – nicht alle Maßnahmen als gleichermaßen gut geeignet, um diesen Erkennensprozess zu fördern und damit zum Entstehen von Sequenzeffekten beizutragen.

Experiment 4 und 6 liefern darüber hinaus deutliche Hinweise darauf, dass Aufgabensequenzierung als metakognitive Strategie zur Beeinflussung der Problemlöseperformanz tatsächlich eingesetzt wird. Problemlöser in Experiment 4 reagierten

sensibel auf die Präsentationssequenz zu bearbeitender Aufgaben, indem sie vor allem von einer ungünstigen Präsentationssequenz abwichen und eine andere Bearbeitungsreihenfolge wählten. Das Vorgehen bei der Umsequenzierung bestand im Wesentlichen darin, ungeachtet der strukturellen Ähnlichkeiten einfache Aufgaben am Anfang zu bearbeiten. Diese experimentellen Befunde stützen damit auch die Ergebnisse der Fragebogenstudie, in der die befragten Studierenden angegeben hatten, vornehmlich solche Aufgaben zuerst zur Bearbeitung auszuwählen, die ihnen gut lösbar erschienen.

Während sich die allgemeine Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung als unabhängig vom domänenspezifischen Vorwissen der Versuchspersonen erwies, ergaben sich vorwissensabhängige qualitative Unterschiede bezüglich der gewählten Aufgabensequenz und auch bezüglich der Problemlöseperformanz in Abhängigkeit vom Sequenzierungsverhalten. Lediglich Versuchspersonen mit hohem Vorwissen zeigten eine – wenn auch nur moderate – Verbesserung der Problemlöseperformanz, wenn sie von einer vorgegebenen Präsentationssequenz abwichen, während sich Versuchspersonen mit niedrigem Vorwissen tendenziell durch eine Aufgabensequenzierung sogar verschlechterten. Auffallend ist, dass sich durch eine Aufgabensequenzierung Veränderungen in der Problemlöseperformanz für Versuchspersonen mit hohem Vorwissen unabhängig von der Qualität der Präsentationssequenz ergaben. Das bedeutet insbesondere, dass eine Aufgabensequenzierung auch dann zu einer Leistungsverbesserung führte, wenn von einer günstigen Sequenz abgewichen wurde. In Experiment 6 konnte für eine nicht weiter hinsichtlich des Vorwissens unterschiedene Stichprobe gezeigt werden, dass es zu einem Performanzgewinn kommt, wenn Problemlöser für eine ungünstige Präsentationssequenz eine Umsequenzierung der Aufgaben vornehmen.

Insgesamt können im Hinblick auf Effekte einer Aufgabensequenzierung folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Erstens kann eine Aufgabensequenzierung mit Leistungsverbesserungen assoziiert sein, sie kann aber auch zweitens bei geringem domänenspezifischem Vorwissen zu Beeinträchtigungen der Problemlöseperformanz führen. Geht man davon aus, dass die Festlegung einer geeigneten Bearbeitungsreihenfolge Wissen bezüglich struktureller Ähnlichkeiten der Aufgaben voraussetzt, ist es durchaus erklärbar, warum überwiegend Personen mit hohem Vorwissen durch Anwendung dieser Strategie ihre Performanz steigern können. Drittens verweisen sowohl die Abhängigkeit von Sequenzeffekten vom Vorliegen einer Sequenzierung-

sinstruktion als auch die Tatsache, dass performanzbezogene Effekte nicht durch die Qualität der vorgegebenen Präsentationssequenz moderiert wurden, dass allein das Nachdenken über eine geeignete Bearbeitungsreihenfolge und die damit verbundenen Beurteilungs- und Vergleichsprozesse leistungsförderlich sein können. Das heißt, Leistungsverbesserungen treten auf, ohne dass damit tatsächlich eine Umsequenzierung verbunden sein muss bzw. ohne dass die veränderte Präsentationssequenz ursprünglich ungeeignet für einen analogen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben gewesen sein muss.

Das abschließende Kapitel 8 liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse der verschiedenen empirischen Studien im Hinblick auf die eingangs in der Arbeit vorgestellten theoretischen Erörterungen zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Aufgabenbearbeitung. Zusätzlich wird ein Ausblick auf künftige Forschungsfragen gewährt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildet die theoretische Analyse und empirische Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben. Sequenzeffekte ergeben sich, wenn die Performanz bei der Bearbeitung mehrerer Aufgaben in Abhängigkeit von der vorgegebenen Reihenfolge variiert, in der diese Aufgaben bearbeitet werden. Sequenzierungseffekte resultieren dagegen, wenn sich die Problemlöseperformanz von Personen, die multiple Aufgaben in einer vorgegebenen Präsentationssequenz bearbeiten, von der Performanz derjenigen Personen unterscheidet, die – abweichend von dieser Präsentationssequenz – eine andere Bearbeitungsreihenfolge wählen und damit eine Sequenzierung der Aufgaben vornehmen.

Ziel dieses Abschlusskapitels ist es, die wesentlichen Befunde der Fragebogenstudie und der sechs Experimente zusammenzufassen und diese vor dem Hintergrund des im theoretischen Teil der Arbeit entwickelten integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung sowie basierend auf Überlegungen zur Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie zu diskutieren. In Abschnitt 8.1 wird eine Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte bei der Entwicklung des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten gegeben. Empirische Belege zu den zentralen Annahmen dieses Modells sind in Abschnitt 8.2 zusammengefasst. In Abschnitt 8.3 werden abschließend Ergebnisse zur Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie diskutiert.

8.1 Überblick über die Entwicklung eines integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung

Der mit der vorliegenden Arbeit verbundene theoretische Anspruch besteht darin, ein integratives Rahmenmodell zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung unterschiedlicher Aufgabenarten beschrieben werden kann. Sequenzeffekte werden dabei als Folge von zwei distinkten Prozessen, nämlich Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und Transfer auf nachfolgende Aufgaben aufgefasst. Die Entwicklung dieses Modells erfolgte in vier Schritten, deren

wesentliche Inhalte in den folgenden vier Abschnitten noch einmal zusammengefasst werden: (1) Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben, (2) Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben, (3) Kognitionswissenschaftliche Reanalyse der Rahmenkonzeption mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT und (4) Erweiterung der Reanalyse um Bedingungen erfolgreichen analogen Transfers. Im Abschnitt 8.1.5 werden die zentralen Annahmen des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten als Gegenstand der eigenen Untersuchungen dargestellt.

8.1.1 Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben

Den Ausgangspunkt für die Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben bildet in der vorliegenden Arbeit zunächst ein Überblick über den Stand der Forschung im Hinblick auf die Existenz von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben (*knowledge-lean problems* nach VanLehn, 1989). Betrachtet wurden dabei elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben, Aufgaben zur Regelinduktion sowie so genannte Transformationsaufgaben. Gemeinsames Merkmal dieser verschiedenen Aufgabenklassen ist, dass ihre erfolgreiche Bearbeitung auf der Basis der in der Aufgabenstellung und in der Instruktion enthaltenen Informationen erfolgt und nur in geringem Ausmaß den Einsatz domänenspezifischen Vorwissens verlangt.

Für voraussetzungsarme Aufgaben lassen sich in den drei Aufgabenklassen Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität sowie nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit nachweisen, wobei nicht für alle drei Aufgabenklassen der Einfluss beider Faktoren untersucht bzw. nachgewiesen wurde. Es zeigen sich Vorteile einer Anordnung der zu bearbeitenden Aufgaben nach zunehmender im Vergleich zu abnehmender Komplexität bei der Bearbeitung von Regelinduktionsaufgaben, bei denen die Identifikation von Gesetzmäßigkeiten erforderlich ist, die zwischen verschiedenen Stimuli bestehen. Empirische Befunde zeigen, dass diese Identifikation auf der Basis der Darbietung mehrerer Instanzen der zu entdeckenden Regel dann erleichtert ist, wenn zunächst einfache Regeln und dann den einfachen Regeln ähnliche, aber zunehmend komplexere Regeln erkannt werden müssen, als wenn eine inverse Aufgabensequenz bearbeitet werden muss (Sweller, 1976; 1980a, b; Sweller & Gee, 1978).

Darüber hinaus ergeben sich für alle drei Klassen voraussetzungsarmer Aufgaben Sequenzeffekte in Abhängigkeit von der Anordnung der Aufgaben nach ihrer Ähnlichkeit bezüglich lösungsrelevanter Strukturmerkmale. Elementare Reiz-Reaktions-Aufgaben erfordern die instruktionsgemäße Ausführung einer einfachen Reaktion auf elementare Reize, die nur hinsichtlich weniger Merkmalsdimensionen variiert werden. Gemäß Befunden aus dem Taskshift-Paradigma werden Mengen von Reiz-Reaktions-Aufgaben dann schneller bearbeitet, wenn strukturidentische Aufgaben geblockt dargeboten werden, als wenn bei der Bearbeitung zwischen Aufgaben unterschiedlichen Typs gewechselt werden muss (Allport et al., 1994; Jersild, 1927; Mayr & Keele, 2000; Monsell, 1996; Rogers & Monsell, 1995; Rubinstein et al., 2001; Spector & Biederman, 1976). Transformationsaufgaben wie z.B. der Turm von Hanoi sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nur eine endliche Menge von Zuständen annehmen können, auf die eine sehr begrenzte Menge von Operatoren angewendet werden kann, um den Ausgangszustand der Aufgabe in den Zielzustand zu transformieren (Anzai & Simon, 1979; Greeno, 1978; Kotovsky et al., 1985; Newell & Simon, 1972; Simon, 1975). Für diese Aufgaben sowie für Regelinduktionsaufgaben lässt sich der so genannte Einstellungseffekt zeigen, der darin besteht, dass die wiederholte Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben die anschließende Bearbeitung einer strukturell unähnlichen Kriteriums Aufgabe erschwert. Wird die Kriteriums Aufgabe jedoch am Anfang der Aufgabensequenz bearbeitet, ist sie dagegen gut lösbar, so dass es im Hinblick auf die Gesamtperformanz zu einem Sequenzeffekt zu Gunsten dieser Abfolge kommt (Luchins, 1942; Luchins & Luchins, 1959; Sweller 1980b; Sweller & Gee, 1978).

Zur Erklärung der Entstehung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben existieren in Abhängigkeit von der zur Untersuchung verwendeten Aufgabenklasse und der Art des Effekts verschiedene Ansätze, die jedoch gewisse Gemeinsamkeiten aufweisen. Diese Gemeinsamkeiten erlauben die Formulierung mehrerer allgemeiner Annahmen zur Entstehung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung, die in einem ersten Schritt zur Entwicklung eines integrativen Rahmenmodells genutzt werden können.

Danach beruhen Sequenzeffekte erstens darauf, dass es durch die Bearbeitung einer Aufgabe zu einer Veränderung des kognitiven Systems kommt, bei der neue Wissenseinheiten generiert bzw. bereits bestehende Wissenseinheiten modifiziert werden (Lernen bei der Aufgabenbearbeitung). Diese neu generierten oder modifi-

zierten kognitiven Strukturen können dann zweitens durch eine Wissensübertragung bei der Bearbeitung nachfolgender Aufgaben angewendet werden (Transfer). Für voraussetzungsarme Aufgaben besteht der Lernprozess vor allem in einer zunehmenden Aktivierung und Stärkung lösungsrelevanten Wissens und zu einem geringeren Anteil auch im Erwerb neuer Regeln. Außerdem wird für diese Aufgabenart davon ausgegangen, dass ein Transfer auf nachfolgende Aufgaben weitestgehend automatisch erfolgt (*low road transfer* nach Salomon & Perkins, 1989), indem sich die bessere Verfügbarkeit von Wissensstrukturen im Gedächtnis positiv auf die Bearbeitung nachfolgender strukturell ähnlicher Aufgaben sowie negativ auf die Bearbeitung nachfolgender strukturell unähnlicher Aufgaben auswirkt.

Sequenzeffekte können dann entstehen, wenn die miteinander verglichenen Bearbeitungssequenzen sich in dem Ausmaß entscheiden, indem sie einerseits ein Lernen bei der Aufgabenbearbeitung unterstützen und/oder indem sie es andererseits ermöglichen, dass dieses Wissen zur Bearbeitung einer nachfolgenden Aufgabe angewendet wird. Während Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung vor allem durch eine Anordnung der Aufgaben nach ihrer relativen Komplexität beeinflusst zu werden scheinen, wirkt sich die Anordnung der Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit vor allem auf die Möglichkeit eines Wissenstransfers zwischen aufeinander folgenden Aufgaben aus.

8.1.2 Analyse von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

Eine für die Entwicklung eines Rahmenmodells für die Entstehung von Sequenzeffekten entscheidende Frage ist, inwieweit diese Annahmen zu Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und zu Transfer auch für voraussetzungsreiche Aufgaben (*knowledge-rich problems* nach VanLehn, 1989) – als Gegenstand der eigenen Untersuchungen – gültig sind. Eine im zweiten Schritt vorgenommene Analyse ergibt für die Entstehung von Sequenzeffekten bedeutsame Unterschiede von voraussetzungsreichen gegenüber voraussetzungsarmen Aufgaben. Diese Unterschiede beziehen sich einerseits auf die Rolle domänenspezifischen Vorwissens bei der Aufgabenbearbeitung und andererseits auf die Bedeutung von lösungsirrelevanten Oberflächenmerkmalen:

- Erstens sind voraussetzungsreiche Aufgaben per definitionem dadurch gekennzeichnet, dass Problemlöser zu ihrer Lösung in hohem Ausmaß auf (zu-

vor vermitteltes) domänenspezifisches Wissen zurückgreifen müssen. Die Verfügbarkeit dieses Vorwissens determiniert die zur Aufgabenbearbeitung einsetzbaren Methoden und die resultierende Performanz. In Abhängigkeit von dem Ausmaß, in dem ein Problemlöser bereits über Erfahrungen in einer Domäne verfügt, kann Vorwissen für die Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben entweder als so genanntes Fallwissen (Reimann, 1997; Strube & Janetzko, 1990) vorliegen oder in Form mehr oder weniger abstrakter Aufgabenschemata (Blessing & Ross, 1996; Cummins, 1992; Hinsley et al., 1977; Marshall, 1995; VanLehn, 1989). Fallwissen besteht in konkreten Repräsentationen einzelner Problemlöseerfahrungen, auf die zurückgegriffen werden kann, um eine neue Aufgabe *analog* zu dieser früheren Problemlöseepisode zu lösen (Gentner, 1983; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Holyoak & Thagard, 1997; Novick, 1988, 1995; Vosniadou & Ortony, 1989). Es wird als Vorstufe beim Fertigkeitserwerb angesehen, der sich von zunächst konkreten Repräsentationen zu zunehmend abstrakten Wissensstrukturen z.B. in Form von Aufgabenschemata oder Regeln vollzieht (Anderson et al., 1997). Verfügt ein Problemlöser bereits über hinreichend Expertise in einer Domäne, ermöglicht ihm dies, neue Aufgaben durch Heranziehung bereits vorhandener Aufgabenschemata – als abstrakte Repräsentationen von Wissen über Aufgabenkategorien und damit assoziierten Lösungsprozeduren – zu bearbeiten.

- Zweitens beinhalten voraussetzungsreiche Aufgaben oftmals eine sehr umfangreiche semantische Einbettung der eigentlichen lösungsrelevanten Information, während voraussetzungsarme Aufgaben meistens auf wenige, lösungsrelevante Reizdimensionen beschränkt sind. Eine wesentliche Anforderung an den Problemlöser besteht daher bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben zunächst darin zu identifizieren, welche Aufgabenmerkmale für die Lösung relevant und welche irrelevant sind (Catrambone, 1998, 2002; Ross, 1984, 1987, 1989a, b; Medin & Ross, 1989). Werden Oberflächenmerkmalen fälschlicherweise als relevant für die Aufgabenbearbeitung beurteilt, kann dies in negativen Konsequenzen für das Vorgehen bei der Problembearbeitung und für die Lösungsqualität resultieren (Gick & Holyoak, 1987; Novick, 1988). Domänenspezifisches Vorwissen bietet eine wesentliche Voraussetzung für die Fähigkeit von Problemlösern, zu bearbeitende Aufgaben anhand ihrer Strukturmerkmale mental zu repräsentieren (Chi et al., 1981;

1982; Cummins, et al., 1988; Hardiman et al., 1989; Kintsch & Greeno, 1985; Kintsch, 1998; Nathan et al., 1992; Reusser, 1994; Schoenfeld & Herrmann, 1982; Silver, 1981; Staub & Reusser, 1995; Weaver & Kintsch, 1992).

Diese beiden Unterschiede zwischen voraussetzungsarmen und voraussetzungsreichen Aufgaben haben entscheidende Konsequenzen für die Formulierung eines integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten:

- Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben besteht nicht nur in der zunehmenden Aktivierung bereits bestehender Wissensstrukturen oder im Erwerb neuer Regeln. Stattdessen wird angenommen, dass gerade analoges Problemlösen auf der Basis konkreter Repräsentationen früherer Problemlöseepisoden in zusätzlichem Fallwissen in Form einer mentalen Repräsentation der Aufgabe zusammen mit ihrer Lösung oder – wenn bereits Fallwissen für mehrere Instanzen einer Aufgabenkategorie vorliegt – in Aufgabenschemata resultiert. Beim Einsatz schemabasierter Problemlösemethoden sollte es dagegen vor allem zu einer Automatisierung der zur Aufgabebearbeitung verwendeten Schemata kommen (Sweller et al., 1998).
- Ein Wissenstransfer auf nachfolgende Aufgaben erfolgt für voraussetzungsreiche Aufgaben nicht überwiegend automatisch, sondern setzt voraus, dass Problemlöser zunächst potenziell vorhandene strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben erkennen. Dieser Identifikationsprozess wird wesentlich durch die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens beim Problemlöser sowie durch die Ausprägungen der lösungsirrelevanten Oberflächenmerkmale der Aufgaben mit gesteuert, die bei voraussetzungsarmen Aufgaben kaum eine Rolle spielen.

Empirische Nachweise für Sequenzeffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben sind selten (Loftus & Suppes, 1972; Suppes et al., 1968; Suppes et al., 1969; Zollman, 1987). Man kann aber vermuten, dass die Tatsache, dass es bislang nur sporadische Evidenz für ihre Existenz gibt, auch mit den oben genannten spezifischen Eigenschaften voraussetzungsreicher Aufgaben zusammenhängt, die dazu führen, dass Sequenzeffekte nur unter bestimmten Bedingungen auftreten und somit schwerer nachweisbar sind als für voraussetzungsarme Aufgaben.

Eine für die Entwicklung des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten entscheidende Frage ist, inwieweit man den spezifizierten Unterschieden bezüglich der Erklärung der Entstehung von Sequenzeffekten für vorausset-

zungsarme Aufgaben einerseits (aktivationsbasiertes Lernen bei der Aufgabenbearbeitung, automatischer Transfer) und voraussetzungsreichen Aufgaben andererseits (Erwerb prozeduraler und deklarativer Wissensstrukturen bei der Aufgabenbearbeitung, nicht-automatischer Transfer) innerhalb eines Modells gerecht werden kann, ohne damit die Präzision der einzelnen Erklärungsansätze zu gefährden.

8.1.3 Kognitionswissenschaftliche Reanalyse der Rahmenkonzeption mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT

Im dritten Schritt der Modellentwicklung wird daher versucht, die einzelnen Erklärungsansätze mit Hilfe der kognitiven Architektur ACT (Anderson, 1983, 1993; Anderson & Lebiere, 1998) stärker zu integrieren und dabei kognitionswissenschaftlich zu präzisieren. ACT vertritt den Anspruch, eine umfassende und präzise Beschreibung kognitiver Zustände sowie von Lern- und Problemlöseprozessen zu ermöglichen und berücksichtigt dabei sowohl elementare Informationsverarbeitungsprozesse als auch komplexe, wissensbasierte Verarbeitungsprozesse. Die Vermutung ist daher gerechtfertigt, dass die Architektur entsprechend ihrer eigenen Ansprüche eine integrative Beschreibung der Annahmen zur Entstehung von Sequenzeffekten ermöglicht.

Lernen bei der Aufgabenbearbeitung kann mit Hilfe von ACT als Veränderung der symbolischen und subsymbolischen Repräsentation deklarativer und prozeduraler Inhalte beschrieben werden. Als Produktionsregelsystem ist ACT geeignet, solche Lernprozesse präzise und umfassend zu analysieren, die sich aus der Verfügbarkeit regelbasierten Wissens zur Aufgabenbearbeitung ergeben. Diese Eignung betrifft sowohl die Beschreibung von Lernen bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer Aufgaben als auch – wenn man akzeptiert, dass das Vorhandensein von Aufgabenschemata durch multiple Produktionsregeln repräsentiert werden kann (vgl. Koedinger & Anderson, 1990) – Lernen bei der schemabasierten Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben.

Für Lernprozesse, die auf der analogen Nutzung konkreter deklarativer Wissensrepräsentationen bei der Aufgabenbearbeitung – und damit nicht auf dem Einsatz aufgabenspezifischen Regelwissens – beruhen, fehlen dagegen in ACT Beschreibungsmöglichkeiten. Diese Einschränkungen betreffen einerseits den Erwerb deklarativen Wissens über übergeordnete abstrakte Kategorien und Konzepte, welches in ACT zwar mit Hilfe so genannter *chunk-types* repräsentiert werden kann, zu dessen Entstehung aber keine Annahmen vorliegen. Um ACT als Theorie zur Modellierung

von Analogie als Lernmechanismus einzusetzen, wäre ein Abstraktionsprozess notwendig, bei dem deklarativ repräsentierte, konkrete Instanzen einer Kategorie miteinander verglichen werden können, um die (strukturellen) Gemeinsamkeiten dieser Instanzen zu extrahieren (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1997; Ross & Kennedy, 1990).

Zusätzlich ergeben sich auch bezüglich der Darstellung von Analogie in der Funktion als Problemlöse- bzw. Transfermechanismus Einschränkungen in ACT. Zwar ist es durchaus möglich, Fallwissen in Form von *chunks* im deklarativen Gedächtnis zu repräsentieren, aber die für dessen Erwerb notwendigen analogen Problemlöse- und Transferprozesse können nicht oder nur unzureichend in ACT dargestellt werden. Ein – für voraussetzungsarme Aufgaben angenommener – automatischer *Transfer* auf der Basis übereinstimmender benötigter prozeduraler Wissensbestände kann in ACT relativ erfolgreich dargestellt werden (Singley & Anderson, 1989). Dagegen sind die in ACT getroffenen Annahmen zu einem – für voraussetzungsreiche Aufgaben angenommenen – analogen Transfer auf der Basis deklarativer Aufgabenrepräsentationen entweder nicht mehr mit dem in der aktuellen Version ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) vertretenen Anspruch einer atomaren Wissensrepräsentation kompatibel (Anderson & Thompson, 1989) oder aber sie sind unvollständig (Salvucci & Anderson, 1998). Insbesondere spezifiziert ACT entscheidende Teilprozesse wie die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten zwischen Aufgabenrepräsentationen oder den Abruf von Quellproblemen aus dem Gedächtnis als Voraussetzung für Transfer nicht und berücksichtigt damit nur einen kleinen Ausschnitt des mehrstufigen Transferprozesses. ACT erweist sich folglich zum jetzigen Zeitpunkt als ungeeignet, um einen analogen Wissenstransfer für voraussetzungsreiche Aufgaben darzustellen, bei dem die Wahrnehmung und Interpretation von Aufgabenmerkmalen gegenüber der objektiven Aufgabenstruktur an Bedeutung für das Ergebnis des Problemlöseprozesses gewinnt (Gick & Holyoak, 1987).

8.1.4 Erweiterung der Reanalyse um Bedingungen erfolgreichen analogen Transfers

Um diesem Defizit in der Entwicklung eines integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten entgegen wirken zu können, wird in einem letzten Schritt basierend auf elaborierten Theorien zum analogen Transfer wie Gentners *Structure Mapping* Theorie (Clement & Gentner, 1991; Gentner, 1983; Gentner & Markman,

1994, 1997; Gentner et al., 1993) und Holyoaks *Multiconstraint* Theorie (Gick & Holyoak, 1980, 1983; Holyoak, 1985; Holyoak & Thagard, 1989a, b, 1995, 1997) sowie entsprechender empirischer Befunde eine Analyse der Bedingungen vorgenommen, die für einen (positiven, d.h. erfolgreichen) Transfer gegeben sein müssen. Da Sequenzeffekte zu einem wesentlichen Anteil auf Transfereffekten aufbauen, ist nur unter den Bedingungen, unter denen ein Wissenstransfer zu erwarten ist, auch mit Sequenzeffekten zu rechnen. Ein positiver analoger Transfer setzt nach dieser Bedingungsanalyse folgende Aspekte voraus:

- eine vollständige, hinreichend abstrakte und auf lösungsrelevanten Merkmalen beruhende Repräsentation des zu lösenden Zielproblems,
- eine positive Einschätzung der Nützlichkeit früherer Problemlöseerfahrungen bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgabe,
- aus der Sicht des Problemlösers geringe Kosten der analogen Nutzung früherer Problemlöseerfahrungen im Vergleich zu alternativen Problemlösemethoden,
- Auswahl eines geeigneten, d.h. strukturell ähnlichen, Quellproblems,
- Identifikation geeigneter struktureller Korrespondenzen, erfolgreiche Ergänzung fehlender Informationen und Nutzung der erstellten Korrespondenzen, um einen Lösungsweg für das Zielproblem zu inferieren und
- Wissen bezüglich der Anwendungsbedingungen und Funktionen einzelner Lösungsschritte, um gegebenenfalls eine Adaption des bekannten Lösungswegs vornehmen zu können.

Mindestens drei moderierende Faktoren bestimmen, inwieweit diese Bedingungen im Einzelnen gegeben sind. Hierzu gehören (1) die Ausprägung und Wahrnehmung von Strukturmerkmalen bzw. strukturellen Ähnlichkeiten, (2) das Zusammenspiel von Oberflächen- und Strukturmerkmalen und (3) die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens.

8.1.5 Zentrale Annahmen des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten als Gegenstand der eigenen Untersuchungen

Die Ergebnisse der vier genannten Analyseschritte werden in dem integrativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten zusammengeführt, dessen folgende Annahmen den Gegenstand der eigenen empirischen Untersuchungen zu Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben bilden:

- Eine Anordnung zu bearbeitender Aufgaben nach zunehmender Komplexität begünstigt Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung und führt bei einem Vergleich mit einer in der Komplexität abnehmenden Aufgabenabfolge zu Sequenzeffekten (Untersuchungshypothese 1).
- Eine Anordnung zu bearbeitender Aufgaben nach ihrer strukturellen Ähnlichkeit ermöglicht einen Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben und führt bei einem Vergleich mit einer Aufgabenfolge, in der unähnliche Aufgaben nacheinander präsentiert werden, zu Sequenzeffekten (Untersuchungshypothese 2).
- Das Zusammenwirken von Oberflächen- und Strukturmerkmalen beeinflusst die Art der entstehenden Sequenzeffekte (Untersuchungshypothesen 4 und 5).
- Sequenzeffekte entstehen für voraussetzungsreiche Aufgaben nicht automatisch, sondern setzen voraus, dass ein Problemlöser potenziell vorhandene strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Aufgaben – als Basis für einen analogen Transfer – erkannt hat (Untersuchungshypothese 3). Dementsprechend sollten sich Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten positiv auf das Auftreten von Sequenzeffekten auswirken.
- Sequenzeffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben werden durch die Verfügbarkeit domänenspezifischen Vorwissens moderiert (Untersuchungshypothesen 6 und 7).

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen in Bezug auf diese Annahmen werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

8.2 Sequenzeffekte als Folge günstiger Lern- und/oder Transferbedingungen bei der Aufgabenbearbeitung – empirische Befunde

Die in Kapitel 6 und 7 beschriebenen empirischen Nachweise für Sequenzeffekte beruhen darauf, dass sich die untersuchten Bearbeitungssequenzen sowohl in dem Ausmaß unterscheiden, in dem sie Gelegenheiten zum Lernen bei der Aufgabenbearbeitung bieten als auch in dem Maß, in dem sie einen Wissenstransfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben unterstützen. Im Folgenden sollen zwei experimentell nachgewiesene Arten von Sequenzeffekten anhand der ihnen zugrunde liegenden Wirkmechanismen im Einzelnen diskutiert werden. Sie beruhen einerseits auf der Förderung des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung (8.2.1) und andererseits auf der Förderung von Transferprozessen (8.2.2). Darüber hinaus wird in Abschnitt 8.2.3 die moderierende Rolle domänenspezifischen Vorwissens bei der Entstehung von Sequenzeffekten diskutiert. Abschließend wird in Abschnitt 8.2.4 ein Fazit gezogen, und es wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen sowie auf theoretische Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

8.2.1 Förderung des Lernens bei der Aufgabenbearbeitung

Im Folgenden werden zwei Sequenzeffekte diskutiert, die auf einer besonderen Eignung der hinsichtlich der Problemlöseperformanz überlegenen Aufgabensequenz für Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung - als ein bei der Entstehung von Sequenzeffekten beteiligter Prozess - zurückgeführt werden können. Dabei handelt es sich erstens um einen Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Bearbeitungssequenz bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben sowie zweitens um einen Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Komplexität zunehmenden und bezüglich der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgabenkategorien geblockten Abfolge von Kombinatorikaufgaben.

In Experiment 1 konnte gezeigt werden, dass eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz, in der oberflächlich ähnliche Algebraaufgaben mit variierenden Strukturmerkmalen nacheinander bearbeitet werden mussten, mit besseren Problemlöseleistungen verbunden war als eine nach Strukturmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz. In dieser zuletzt genannten Sequenz waren die gleichen Aufgaben entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einer Aufgabenkategorie ange-

ordnet, so dass damit oberflächlich unähnliche Aufgaben aufeinander folgten. Der Sequenzeffekt war hinsichtlich der Gesamtleistung für alle Aufgaben nachweisbar, konnte aber bei einer genaueren Analyse auf Unterschiede in der Bearbeitungsleistung für bestimmte Aufgaben zurückgeführt werden. Diese Aufgaben waren dadurch gekennzeichnet, dass sie jeweils eine semantische Einbettung aufwiesen, die für Aufgaben einer anderen – ebenfalls in der Testsituation verwendeten – Aufgabenkategorie typisch war. Während sich für diese nicht-korrespondierenden Aufgaben ein deutlicher Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Aufgabensequenz nachweisen ließ, fand sich dieser nicht für korrespondierende Aufgaben, die die Oberflächenmerkmale aufwiesen, die für Aufgaben der jeweiligen Kategorie typisch waren.

Nicht-korrespondierende Aufgaben sind, wie sowohl die Studien von Blessing und Ross (1996) als auch die eigenen Untersuchungen zeigen, schwerer lösbar als Aufgaben, die einen für ihre Aufgabenkategorie typischen oder aber auch einen neutralen Kontext aufweisen. Die mit nicht-korrespondierenden Aufgaben assoziierten höheren Fehlerraten können damit erklärt werden, dass die Oberflächenmerkmale einer nicht-korrespondierenden Aufgabe eine Wissensrepräsentation aktivieren können, welche für die Bearbeitung dieser Aufgabe ungeeignet ist, da sie auf Strukturmerkmalen und Lösungswegen für eine andere Aufgabenkategorie beruht (vgl. Hinsley et al., 1977). Bei diesen Wissensrepräsentationen kann es sich sowohl um Aufgabenschemata als auch um Fallwissen handeln.

Gerade für diese Aufgaben erweist sich eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz als hilfreich, da sie die Aufmerksamkeit des Problemlösers auf die Strukturmerkmale einer Aufgabe lenkt. Interessanterweise sind es gerade die spezifischen Ausprägungen der Oberflächenmerkmale der zu bearbeitenden Aufgaben, die eine korrekte Identifikation der lösungsrelevanten Eigenschaften nicht-korrespondierender Aufgaben ermöglichen. Die Tatsache, dass in einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Bearbeitungssequenz nacheinander präsentierte Aufgaben in den gleichen Kontext eingebettet sind, lässt diese Aufgaben zunächst als besonders ähnlich erscheinen. Gleichzeitig werden durch diese große semantische Ähnlichkeit aber auch Unterschiede zwischen den Aufgaben, die sich auf die strukturellen Eigenschaften beziehen, besonders salient. Dieser als *near miss* bekannt gewordene Kontrasteffekt (Gick & Paterson, 1992; Ross & Kilbane, 1997; Winston, 1975, 1980) erlaubt somit die korrekte Identifikation und Repräsentation struktureller

Eigenschaften einer nicht-korrespondierenden Aufgabe. Entscheidend für das Auftreten dieses Sequenzeffekts ist die spezifische Konfiguration von Oberflächen- und Strukturmerkmalen, bei der Aufgaben verschiedener Aufgabenkategorien identische semantische Einbettungen aufweisen und ohne die die zur Erklärung herangezogenen Kontrasteffekte ausbleiben würden. Diese Kreuzvariation von Oberflächen- und Strukturmerkmalen erweist sich damit – wie im integrativen Rahmenmodell angenommen – als bedeutsam für die Entstehung dieser Art von Sequenzeffekten und bestätigt die von einem *near-miss* Effekt ausgehende Untersuchungshypothese 5.

Es kann angenommen werden, dass eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz zu der Entstehung von Sequenzeffekten beiträgt, indem sie den Erwerb von Wissen über die strukturellen Eigenschaften der zu bearbeitenden Aufgaben fördert und damit Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung unterstützt. Für diese Annahme spricht, dass diese Sequenz nicht nur die Problemlöseperformance bei der Bearbeitung der entsprechenden Aufgaben verbessert, sondern dass sie gleichzeitig mit besseren Leistungen bei der anschließenden Bearbeitung von Transferaufgaben verbunden ist. Für die Lösung dieser Aufgaben ist eine Adaption bekannter Lösungswege erforderlich, die nur auf der Basis elaborierter Kenntnisse bezüglich der Strukturmerkmale verschiedener Aufgaben möglich ist (Catrambone, 1998; Cooper & Sweller, 1987; Novick & Holyoak, 1991; Reed & Bolstad, 1991; Reed et al., 1985; Sweller & Cooper, 1985).

Durch die Betonung struktureller Unterschiede unterstützt eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Bearbeitungssequenz aber auch Prozesse des Wissenstransfers und zwar paradoxerweise, indem sie einen bei dieser Aufgabenanordnung drohenden *negativen* Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben zunächst einmal verhindert. Vergleiche zwischen einer bereits bearbeiteten korrespondierenden Aufgabe (Quellproblem) und einer nachfolgenden nicht-korrespondierenden Aufgabe mit ähnlichen Oberflächen- aber unterschiedlichen Strukturmerkmalen (Zielproblem) ermöglichen es, dass das nicht-korrespondierende Zielproblem korrekt anhand seiner tatsächlichen Strukturmerkmale repräsentiert wird und nicht anhand der durch die Oberflächenmerkmale nahe gelegten Strukturmerkmale. Dies entspricht Annahmen von Ross und Bradshaw (1994) sowie Blanchette und Dunbar (2002), wonach die Repräsentation einer zu lösenden Zielaufgabe durch den Vergleich mit einem potenziellen Quellproblem beeinflusst wird. Damit kann gleichzeitig ein negativer Transfer (Novick, 1988; Pennington & Rehder, 1995) zwischen aufeinander fol-

genden Aufgaben verhindert werden, indem die zuvor gelöste Aufgabe als Quellproblem korrekt zurückgewiesen wird, da sie andere Strukturmerkmale als die aktuell zu bearbeitende Aufgabe aufweist. Aufbauend auf der korrekten Repräsentation des Zielproblems kann stattdessen beispielsweise die Suche nach einem geeigneten Quellproblem erfolgen, welches dann als Analogon zur Konstruktion der Lösung für das Zielproblem genutzt werden kann.

Zusammenfassend können Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Abfolge strukturell unterschiedlicher Aufgaben durch Lernprozesse bei der Aufgabebearbeitung erklärt werden. Diese Lernprozesse resultieren in Wissen bezüglich struktureller Aufgabenmerkmale, welches einerseits einen Einsatz ungeeigneter Problemlösemethoden für die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben verhindert und welches andererseits zur Adaption bereits bekannter Lösungswege an neuartige Aufgabenstellungen genutzt werden kann. Die Verfügbarkeit dieses Wissens wirkt sich so positiv bei der Bearbeitung nicht-korrespondierender Aufgaben sowie bei anschließend zu bearbeitenden Transferaufgaben aus.

Der zweite Sequenzeffekt, der auf die Bedeutsamkeit von Lernprozessen bei der Aufgabebearbeitung hinweist, konnte in Experiment 4 für die Bearbeitung von Kombinatorikaufgaben nachgewiesen werden.

In Experiment 4 führte eine Aufgabensequenz, in der zunächst einfache Aufgaben einer Aufgabenkategorie präsentiert wurden, bevor komplexere Aufgaben der gleichen Kategorie dargeboten wurden, zu besseren Problemlöseleistungen als die Dargebietung der Aufgaben in einer invertierten Sequenz (d.h. komplex – einfach). Zusätzlich wurde die Abfolge der Aufgabenkategorien manipuliert, indem entweder strukturell ähnliche oder strukturell unähnliche Aufgabenkategorien aufeinander folgten.

Ähnlich wie bei dem ersten beschriebenen Sequenzeffekt ergaben sich jedoch nicht nur Leistungsverbesserungen bezüglich derjenigen Aufgaben, deren Präsentationssequenz variiert wurde. Darüber hinaus zeigten Personen, die die Testaufgaben in dieser günstigen Sequenz dargeboten bekommen hatten, fundiertere Kenntnisse im anschließenden Wissenstest, in dem Faktenwissen bezüglich der Bedeutung einzelner Strukturmerkmale und der Unterschiede zwischen Aufgabenkategorien abgefragt wurde. Insbesondere Versuchspersonen, die bereits am Anfang des Experiments über gute Domänenkenntnisse verfügten, profitierten im Wissenstest davon, dass ihnen zuvor die Testaufgaben in einer günstigen Sequenz dargeboten worden waren. Diese Auswirkungen der Präsentationssequenz der Testaufgaben auf den

Erwerb konzeptuellen Wissens kann dahingehend interpretiert werden, dass sich die beiden miteinander verglichenen Aufgabensequenzen bezüglich ihrer Eignung für Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung unterscheiden.

Zum jetzigen Zeitpunkt kann auf der Basis der empirischen Daten nicht abgeschätzt werden, welche relative Bedeutsamkeit dabei die Anordnung der Aufgaben nach ihrer Komplexität bzw. nach der strukturellen Ähnlichkeit der Aufgabekategorien für die Entstehung dieses Sequenzeffekts hat. Über die Validität der Annahme, dass hinsichtlich der Komplexität zunehmende Aufgabensequenzen zu Leistungsverbesserungen führen, indem sie Lernprozesse ermöglichen, kann damit nicht abschließend entschieden werden. Es gibt allerdings – wie eben ausgeführt – Sequenzeffekte, die durch eine Anordnung der Aufgaben nach ihrer Komplexität mit verursacht sein können und deren Entstehung durch Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung erklärt werden kann, so dass ein entsprechender Zusammenhang nahe gelegt wird. Schließlich kann an dieser Stelle darauf verwiesen werden, dass die Annahme eines Zusammenhangs zwischen komplexitätsabhängigen Aufgabenanordnungen einerseits und Lernprozessen andererseits relativ gut auf der Basis der Befunde zur Bearbeitung von Regelinduktionsaufgaben (Sweller, 1976, 1980a, b; Sweller & Gee, 1978) sowie auf theoretische Überlegungen der *Cognitive Load* Theorie und anderen instruktionspsychologischen Theorien begründet werden kann. Aus Perspektive der Instruktionspsychologie gibt es eine Reihe theoretischer und empirischer Belege zur Bedeutsamkeit einer komplexitätsabhängigen Anordnung von *Lernanforderungen* (Collins et al., 1989; Gagné, 1962, 1965; Gagné & Paradise, 1961; van Merriënboer, 1997, van Merriënboer et al., 2002; Silbert et al., 1981) sowie entsprechende Erklärungen auf Basis der *Cognitive Load* Theorie (Sweller, 1999; Sweller et al., 1998). In Einklang mit Annahmen der *Cognitive Load* Theorie kann davon ausgegangen werden, dass die anfängliche Bearbeitung einfacher Aufgaben mit einer geringen aufgabeninhärenten kognitiven Belastung einhergeht, bei der für die Problemlösung nicht benötigte kognitive Ressourcen für Lernprozesse wie z.B. für die Elaboration von Strukturmerkmalen oder für Aufgabenvergleiche zur Verfügung stehen. Das auf diese Weise bei der Aufgabenbearbeitung erworbene Wissen ermöglicht beispielsweise eine Beantwortung entsprechender Fragen im Wissenstest.

Für eine weitere Absicherung des Rahmenmodells sind hier aber auf jeden Fall weiter gehende Untersuchungen notwendig, in denen der Bedeutsamkeit der Anord-

nung von Problemlöseaufgaben gemäß ihrer relativen Komplexität für die Entstehung von Sequenzeffekten nachgegangen wird.

8.2.2 Förderung von Transferprozessen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Sequenzeffekte werden auf der Basis des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten darauf zurückgeführt, dass sich die hinsichtlich der Problemlöseperformanz überlegene Aufgabenabfolge als besonders geeignet für Wissenstransferprozesse zwischen aufeinander folgenden Aufgaben erweist. Dies sollte nach den Annahmen des Rahmenmodells vor allem für Aufgabensequenzen gelten, in den strukturell ähnliche oder sogar identische Aufgaben aufeinander folgen (Untersuchungshypothese 2).

Diese Vorhersage eines Vorteils einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz beruht unter anderem auf dem Nachweis von entsprechenden Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsarmer elementarer Reiz-Reaktions-Aufgaben. Verwendet man diese einfachen Aufgaben und vergleicht geblockte Aufgabenlisten, in denen Aufgaben des gleichen Typs nacheinander bearbeitet werden, mit alternierenden Aufgabenlisten, in denen sich Aufgaben verschiedenen Typs abwechseln, so findet sich die im Rahmen des Taskshift-Paradigmas vielfach replizierte Überlegenheit einer geblockten Bearbeitungssequenz (Allport et al., 1994; Rogers & Monsell, 1995; Rubinstein et al., 2001). Dieser sich für voraussetzungsarme Aufgaben ergebende Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz wird damit erklärt, dass lösungsrelevantes Wissen durch die Aufgabenbearbeitung aktiviert wird. Diese Voraktivierung kann die Abrufbarkeit von Wissen für nachfolgende, typgleiche Aufgaben verbessern bzw. kann aber auch mit der Bearbeitung nachfolgender Aufgaben interferieren, wenn diese im Fall einer alternierenden Aufgabenliste zu einem anderen Aufgabentyp gehören.

Auch das Aktivations-Summations-Modell von Holyoak und Mitarbeitern (Holyoak, 1985; Holyoak & Koh, 1987) zur Beschreibung des *retrieval*-Prozesses beim analogen Problemlösen kann für die Vorhersage genutzt werden, dass sich Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz ergeben sollten. Auch in diesem Modell kann argumentiert werden, dass sich eine Voraktivierung von Wissen, welches für die Bearbeitung einer ersten Aufgabe eingesetzt wurde, automatisch auf die Bearbeitung nachfolgender Aufgaben (leistungshemmend oder –fördernd) auswirken sollte.

Eine entscheidende Annahme des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten ist, dass die Annahme eines automatischen Transfers zwischen aufeinander folgenden, strukturell ähnlichen Aufgaben lediglich für voraussetzungsarme Aufgaben zutrifft. Dagegen wird davon ausgegangen, dass eine Wissensübertragung bei voraussetzungsreichen Aufgaben davon abhängt, ob zunächst strukturelle Ähnlichkeiten zu bereits gelösten Aufgaben erkannt wurden (Untersuchungshypothese 3). Daher sollten sich auf Transfer beruhende Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Bearbeitungssequenz auch nur dann ergeben, wenn diese Vorbedingung erfüllt ist.

In Einklang mit dieser Erklärung ergab sich in den Experimenten 3, 4 und 6 entsprechende Evidenz, dass Sequenzeffekte zu Gunsten einer sukzessiven Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben nur dann auftraten, wenn Problemlöser bereits vor der Aufgabenbearbeitung über Wissen bezüglich struktureller Ähnlichkeiten der Aufgaben verfügten oder wenn während der Aufgabenbearbeitung eine Sequenzierungsanweisung das Erkennen struktureller Aufgabenmerkmale förderte. Diese Befunde werden im Folgenden dargestellt.

In Experiment 3 konnte gezeigt werden, dass es zu einer Invertierung des oben beschriebenen, auf *near miss* beruhenden Sequenzeffekts kommt, wenn Versuchspersonen über Wissen hinsichtlich der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgaben verfügen. Verglichen wurde wie in Experiment 1 eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenz, in der strukturell unterschiedliche Aufgaben aufeinander folgten, mit einer nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz, in der oberflächlich unähnliche Aufgaben aufeinander folgten. Vor der Aufgabenbearbeitung wurden die Versuchspersonen gebeten, die Aufgaben nach ihren lösungsrelevanten Eigenschaften zu kategorisieren. Es ergab sich ein Sequenzeffekt zu Gunsten der sukzessiven Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben mit variierenden Oberflächenmerkmalen. Dieser war allerdings nur für Versuchspersonen mit guten Kategorisierungsleistungen nachweisbar, die über Wissen hinsichtlich der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgaben verfügen. Dieses Wissen ermöglicht es ihnen, einen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben in der nach Strukturmerkmalen geblockten Sequenz zu versuchen. Für Personen, bei denen dagegen nur begrenztes Wissen hinsichtlich relevanter Strukturmerkmale vorliegt und die dementsprechend nur schlechte Leistungen in der Kategorisierungsaufgabe erbringen, erscheinen die Aufgaben einer Aufgabenkategorie auf Grund der variierenden Oberflächenmerkmale vermut-

lich zu unähnlich, um einen Transferprozesses zu initiieren. Das heißt, der mögliche Verzicht auf ein analoges Vorgehen beim Problemlösen kann hier vermutlich durch eine fehlerhafte Einschätzung der Nützlichkeit zuvor bearbeiteter Aufgaben erklärt werden (vgl. Abschnitt 3.2; Gick & Holyoak, 1980, 1983; Hayes & Simon, 1977; Perfetto et al., 1983; Reed et al., 1974; Weisberg et al., 1978).

Ein Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach struktureller Ähnlichkeit geordneten Aufgabensequenz konnte ebenfalls in Experiment 4 bei der Bearbeitung von Kombinatorikaufgaben beobachtet werden. Hier konnte gezeigt werden, dass eine Präsentationssequenz, in der die zu bearbeitenden Aufgaben entsprechend der strukturellen Ähnlichkeiten der Aufgabenkategorien sowie innerhalb der Aufgabenkategorien nach zunehmender Komplexität angeordnet waren, zu besseren Problemlöseleistungen führte, als eine Präsentationssequenz, in der strukturell unähnliche Aufgabenkategorien aufeinander folgten und zunächst jeweils die komplexere Aufgabe einer Aufgabenkategorie dargeboten wurde. Dieser Sequenzeffekt ist in Teilen vermutlich – wie in Abschnitt 8.2.1 – auf die differenzielle Eignung der miteinander verglichenen Sequenzen für Lernprozesse bei der Aufgabebearbeitung zurückzuführen. Darüber hinaus weisen die im Folgenden beschriebenen Befunde darauf hin, dass dieser Sequenzeffekt zusätzlich durch die bessere Eignung der einen Sequenz für Transferprozesse erklärt werden kann.

Entscheidend ist für diese Interpretation, dass ein Sequenzeffekt sich nicht automatisch einstellte, wenn die Aufgaben in der günstigen Sequenz als fest vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge vorgegeben wurden (Experiment 5). Stattdessen war ein Vorteil der nach struktureller Ähnlichkeit geordneten Aufgabensequenz nur dann beobachtbar, wenn gleichzeitig eine Instruktion dargeboten wurde, in der die Problemlöser darauf hingewiesen wurden, dass sie eine eigene Bearbeitungsreihenfolge bestimmen könnten und dass sie zu diesem Zweck die Aufgaben zunächst genau lesen sollten. Diese Instruktion zur Aufgabensequenzierung regt vermutlich eine tiefer gehende Verarbeitung der Aufgaben an und fördert so vermutlich auch die Wahrnehmung struktureller Aufgabenmerkmale als Voraussetzung für analoge Problemlöseprozesse (vgl. Abschnitt 8.3). Der Sequenzeffekt zu Gunsten der nach Strukturmerkmalen geblockten Aufgabensequenz stellte sich unabhängig davon ein, ob Problemlöser dieser Instruktion folgten, indem sie eine eigene Bearbeitungssequenz festlegten, oder ob sie die Präsentationssequenz für die Aufgabebearbeitung beibehielten.

Interessanterweise scheint die in Experiment 4 verwendete Instruktion zur Aufgabensequenzierung eine spezifische Wirkung im Hinblick auf die Förderung von Transferprozessen zu haben, die nicht allein dadurch erklärt werden kann, dass sie Vergleiche der zu bearbeitenden Aufgaben nahe legt. In Experiment 6 konnte nämlich gezeigt werden, dass die Vorgabe einer Beurteilungsaufgabe zur Förderung von Aufgabenvergleichen nicht die gleichen Effekte wie eine Sequenzierungsinstruktion hervorbringt. In diesem Experiment wurden die Versuchspersonen vor der eigentlichen Bearbeitung der Aufgaben in einer der beiden fest vorgegebenen Aufgabensequenzen aufgefordert, für jedes mögliche Aufgabenpaar anzugeben, wie nützlich ihnen die Lösung der jeweils ersten Aufgabe für die Bearbeitung der zweiten Aufgabe erschiene. Diese Beurteilungsaufgabe, in der Aufgabenvergleiche explizit gemacht wurden, führte jedoch nicht zu dem in Experiment 4 beobachteten Sequenzeffekt.

Stattdessen konnte die Annahme einer spezifischen Wirkung der Sequenzierungsinstruktion gestützt werden, indem darüber hinaus in Experiment 6 gezeigt werden konnte, dass die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung einen Leistungsvorteil gegenüber einer fest vorgegebenen Bearbeitungssequenz erbringt und zwar sowohl im Hinblick auf die Problemlöseperformanz als auch auf die Performanz in dem anschließend an die Problemlösephase eingesetzten Wissenstest. Der letzte Befund kann dahingehend interpretiert werden, dass die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung und die damit assoziierte tiefer gehende Auseinandersetzung mit den für die Aufgabendomäne relevanten Strukturmerkmalen in einem verbesserten Erwerb konzeptuellen Wissens zum Ausdruck kommt (vgl. auch Abschnitt 8.3.2).

Zusammenfassend setzen Sequenzeffekte, die auf einer Förderung eines Wissenstransfers durch sukzessive Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben beruhen, voraus, dass die strukturellen Beziehungen zwischen diesen Aufgaben erkannt wurden. Das Erkennen struktureller Ähnlichkeiten kann entweder auf Grund von Vorwissen möglich sein, oder es können während der Aufgabenbearbeitung Bedingungen gegeben sein (z.B. eine Sequenzierungsinstruktion), die zu einer tiefer gehenden Auseinandersetzung mit den zu bearbeitenden Aufgaben und ihren lösungsrelevanten Eigenschaften führen. Die Tatsache, dass die hier beschriebene Art von Sequenzeffekten nur unter bestimmten Bedingungen beobachtbar ist, deckt sich mit Befunden zum analogen Problemlösen, wonach ein analoger Transfer selten spontan eintritt, sondern häufig erst durch Hinweise bezüglich der strukturellen Ähnlichkeiten zwischen einer zu lösenden Aufgabe und früheren Problemlöseerfahrungen an-

geregt werden muss (Gentner et al., 1993; Gick & Holyoak, 1983; Keane, 1987). Eine zentrale Annahme des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten kann damit als bestätigt angesehen werden: Sequenzeffekte, die auf der Eignung einer Aufgabensequenz für einen positiven Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben beruhen, stellen sich nicht automatisch als Folge der günstigen Anordnung der Aufgaben ein, sondern setzen voraus, dass die zwischen den Aufgaben bestehenden strukturellen Ähnlichkeiten durch den Problemlöser erkannt wurden.

Die Annahme einer Moderation von Sequenzeffekten durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen wird im nächsten Abschnitt behandelt.

8.2.3 Interaktion von Sequenzeffekten mit dem domänenspezifischen Vorwissen

Hinsichtlich der Bedeutung domänenspezifischen Vorwissens für die Entstehung von Sequenzeffekten wurden zwei gegensätzliche Hypothesen aufgestellt: Die erste Hypothese besagt, dass Personen mit geringem Vorwissen von günstigen Problemlösebedingungen wie einer die Bearbeitung erleichternden Aufgabensequenz profitieren sollten, während Problemlöser mit hohem domänenspezifischem Vorwissen möglicherweise ungünstige Problemlösebedingungen durch den Einsatz alternativer Bearbeitungsstrategien kompensieren können (Untersuchungshypothese 7). Ähnliche Überlegungen finden ihren Niederschlag in instruktionspsychologischen Ansätzen zur Sequenzierung von *Lerninhalten* beim Erwerb konzeptuellen Wissens (Brown, 1970; Buckland, 1968; Levin & Baker, 1963; Niedermeyer et al., 1969). Somit sollten Sequenzeffekte vor allem für Problemlöser mit geringem Vorwissen nachweisbar sein.

Die entgegen gesetzte Hypothese (Untersuchungshypothese 6) postuliert dagegen, dass Sequenzeffekte gerade für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen beobachtbar sein sollten, während Personen mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen nicht über die für einen analogen Transfer – als Voraussetzung für Sequenzeffekte – notwendigen Kenntnisse verfügen. Beispielsweise sind sie vermutlich schlechter in der Lage, strukturelle Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben zu erkennen und damit potenzielle Transferbeziehungen zu nutzen (vgl. Novick, 1988).

In Einklang mit dieser zweiten Hypothese konnte Experiment 3 zur Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung von Algebraaufgaben ein durch die Qualität einer Aufgabenkategorisierungsaufgabe moderierter Sequenzeffekt nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 8.2.2). In diesem Experiment wurden die Versuchspersonen vor der eigentlichen Aufgabenbearbeitung aufgefordert, die Aufgaben zunächst nach ihren lösungsrelevanten Eigenschaften in Kategorien zu sortieren. Versuchspersonen, die bei dieser Kategorisierungsaufgabe relativ gute Leistungen erbrachten, indem sie die Aufgaben überwiegend nach ihren Strukturmerkmalen kategorisierten, zeigten bei der anschließenden Aufgabenbearbeitung einen Sequenzeffekt zu Gunsten einer sukzessiven Bearbeitung strukturell ähnlicher Aufgaben mit variierenden Oberflächenmerkmalen im Vergleich zu einer Aufgabensequenz, in der die Aufgaben nach ihren Oberflächenmerkmalen geblockt präsentiert wurden. Für Personen mit schlechteren Kategorisierungsleistungen war dagegen kein Sequenzeffekt nachweisbar. Diese Befunde stützen damit die Hypothese, dass Sequenzeffekte vor allem für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen zu beobachten sein sollten, während Personen mit schlechteren Eingangsvoraussetzungen nicht über die für einen analogen Transfer notwendigen Kenntnisse verfügen und sie daher nicht von einer für Transferprozesse günstigen Aufgabensequenz profitieren.

Im Gegensatz zu diesem Befund lässt sich in den Experimenten zur Bearbeitung von Kombinatorikaufgaben keine empirische Evidenz für die moderierende Rolle domänenspezifischen Vorwissens bei der Entstehung von Sequenzeffekten ausmachen. In Experiment 4 (mit Sequenzierungsinstruktion), in dem eine a priori als günstig definierte Präsentationssequenz von Kombinatorikaufgaben (sukzessive Bearbeitung von Aufgaben aus strukturell ähnlichen Aufgabenkategorien, zunehmende Aufgabenkomplexität) mit einer Kontrollsequenz sowohl für Personen mit niedrigem als auch mit hohem Vorwissen verglichen wurde, erwiesen sich die beobachteten Sequenzeffekte als unabhängig vom Vorwissen der Problemlöser. Auch in Experiment 5, bei dem im Gegensatz zu Experiment 4 keine Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung bestand, war das Ausbleiben von Sequenzeffekten sowohl für Personen mit niedrigem als auch mit hohem Vorwissen beobachtbar. In Experiment 6 wurde unter anderem wegen dieser offensichtlichen geringen Bedeutsamkeit des Vorwissens auf eine weitere Unterteilung der Versuchspersonen in unterschiedliche Vorwissensgruppen verzichtet.

Verschiedene Erklärungen können für diese Widersprüchlichkeit der Befunde angeführt werden:

- Erstens kann es sein, dass der in den Kombinatorikexperimenten verwendete Vorwissenstest zu unspezifisch im Hinblick auf die Fragestellung der Untersuchung war, auch wenn er sich bereits in anderen Untersuchungen mit HYPERCOMB bewährt hatte (Gerjets et al., 2000, 2002). Die Argumente, die für eine Moderierung von Sequenzeffekten durch das Vorwissen sprechen, konzipieren Vorwissen im Wesentlichen als Fähigkeit zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten als Voraussetzung für Transferprozesse. Diese Fähigkeit wird im Vorwissenstest nur sehr indirekt mit Hilfe von Items zur Bedeutung der Strukturmerkmale und zu Unterschieden zwischen verschiedenen Aufgabenkategorien erfasst. In Einklang mit dieser Erklärung lässt sich eine Moderation von Sequenzeffekten durch ein sehr spezifisches und vor allem performanznahes Vorwissensmaß nachweisen, das genau die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten für die zu bearbeitenden Aufgaben erfasst, nämlich für die Qualität der Aufgabenkategorisierung (Experiment 3). Dem zu Folge erscheint es sinnvoll, in nachfolgenden Untersuchungen performanznahe Vorwissensmaße zu verwenden, die enger auf die in der Problemlösesituation notwendigen Fertigkeiten abgestimmt sind.
- Zweitens kann es sein, dass vor der Lernphase vorhandene Vorwissensunterschiede, wie sie durch den zu Beginn des Experiments eingesetzten Fragebogen erfasst wurden, durch gute Lernstrategien wie z.B. ein intensives Studium der Beispiele, kompensiert werden konnten und sich daher in der Testphase nicht weiter auswirkten. Auch dies war in früheren Untersuchungen mit HYPERCOMB nicht der Fall gewesen. Allerdings wurde in der in dieser Arbeit verwendeten Variante der Lernumgebung eine Modifikation der Lernphase vorgenommen und zwar dahingehend, dass anstelle von drei Beispielen pro Aufgabenkategorie, die alle die einfache Anwendung des Lösungsprinzips illustrierten (Ursprungsversion), nur zwei Beispiele verwendet wurden, von denen eines die einfache Anwendung und ein weiteres Beispiel die zweifache Anwendung des Lösungsprinzips erläuterte. Die Tatsache, dass insbesondere die Lösungsraten für die in der Testphase verwendeten einfachen Aufgaben im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit HYPERCOMB verhältnismäßig hoch sind, lässt Rückschlüsse auf die Qualität der Lernphase zu. Die Problemlöse-

leistungen sind zwar nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Aufgaben verwendet wurden, aber es ist nicht auszuschließen, dass zu Beginn der Lernphase bestehende Vorwissensunterschiede durch gute Möglichkeiten zur Kompensation dieser anfänglichen Defizite in der Lernphase nivelliert wurden. Dies würde vor allem auch erklären, warum keine Haupteffekte des Vorwissensfaktors auf Problemlöseleistungen nachgewiesen werden konnten. Diesem Problem der möglichen Nivellierung von Vorwissensunterschieden kann in nachfolgenden Untersuchungen begegnet werden, indem eine weitere Erhebung des Vorwissens nach Abschluss der Lernphase vor Beginn der eigentlichen Testphase vorgenommen wird.

- Drittens können fehlende Effekte des Vorwissens durch die Nutzung von Mediansplits zur Definierung unterschiedlicher Vorwissensgruppen bedingt sein. Auf diese Weise erfolgt eine Zuordnung einer Person zu einer dieser Gruppen immer relativ zu der Verteilung des betrachteten Merkmals in der untersuchten Stichprobe, der sie angehört. Diesem methodischen Problem kann nur durch eine aufwändige Normierung des jeweiligen Erhebungsverfahrens an einer repräsentativen Stichprobe begegnet werden, welche im üblichen Untersuchungskontext jedoch kaum möglich ist. Selbst bei Verwendung eines normierten Vorwissenstest kann jedoch immer noch keine Aussage über die psychologische Bedeutsamkeit der Zuordnung von Personen zu bestimmten Vorwissensgruppen im Hinblick auf die interessierende Fragestellung getroffen werden.

Die Ergebnisse von Experiment 3 legen nahe, dass für im Hinblick auf die Vorhersage der Problemlöseperformanz spezifischere Vorwissensmaße ein Zusammenhang mit Sequenzeffekten nachgewiesen werden kann und zwar dahingehend, dass hohes Vorwissen im Sinne gut ausgeprägter Fertigkeiten zum Erkennen struktureller Ähnlichkeiten für zu bearbeitende Aufgaben das Entstehen von Sequenzeffekten fördert. Allerdings kann die Rolle des Vorwissens bei der Entstehung von Sequenzeffekten nicht abschließend beurteilt werden.

8.2.4 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Experimente, dass sich Sequenzeffekte auch bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben nachweisen lassen und zwar in Abhängigkeit von einer Anordnung der Aufgaben nach Komplexität und

nach struktureller Ähnlichkeit, wobei zusätzlich die Konfiguration von Oberflächen- und Strukturmerkmalen berücksichtigt werden muss. Sequenzeffekte, die durch eine differentielle Eignung der untersuchten Sequenzen für einen Wissenstransfer entstehen, sind nur dann zu beobachten, wenn gewährleistet ist, dass Problemlöser über Kenntnisse hinsichtlich der strukturellen Ähnlichkeiten der zu bearbeitenden Aufgaben verfügen.

Die Tatsache, dass Sequenzeffekte für voraussetzungsreiche Aufgaben diese starke Kontextabhängigkeit aufweisen, führt dazu, dass sie insgesamt schwerer nachweisbar sind und instabiler erscheinen als Sequenzeffekte bei voraussetzungsarmen Aufgaben, deren Auftreten zwar ebenfalls durch Kontextfaktoren moderiert wird, die aber weniger leicht vollständig zum Verschwinden gebracht werden können. Methodische Schwierigkeiten bei der Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben ergeben sich einerseits daraus, dass moderierende Faktoren nur schwer fassbar sind wie beispielsweise die Fähigkeit zum Erkennen struktureller Aufgabenähnlichkeiten. Zusätzlich resultieren Schwierigkeiten aus der Tatsache, dass Sequenzeffekte sowohl auf Lern- als auch auf Transferprozesse zurückgehen. Diese Prozesse können unterschiedlich und vor allem auch gegenläufig auf moderierende Faktoren reagieren. Zum Beispiel konnte gezeigt werden, dass eine Anordnung nach struktureller Ähnlichkeit zwar Transferprozesse fördern kann, dass aber gleichzeitig die Darbietung strukturell unterschiedlicher Aufgaben den Wissenserwerb über strukturelle Merkmale unterstützt.

Daraus folgt unter anderem, dass zur weiteren Fundierung des integrativen Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten in nachfolgenden Untersuchungen auch Prozessmaße eingesetzt werden sollten, die weiteren Aufschluss über die beiden Teilkomponenten – Lernen bei der Aufgabenbearbeitung und Transfer – liefern. Hier bieten sich vor allem Laut-Denk-Protokolle an (Ericsson & Simon, 1993), mit deren Hilfe sowohl für Lernen bei der Aufgabenbearbeitung relevante kognitive Prozesse wie z.B. Selbsterklärungen (Chi, Bassok, Lewis, Reimann & Glaser, 1989; Chi, 2000; Pirolli & Recker, 1994; Renkl, 1997) als auch für Transfer bedeutsame kognitive Aktivitäten wie z.B. Vergleiche zwischen Aufgaben oder die Suche nach strukturellen Korrespondenzen aufgedeckt werden können.

Weitere methodische Probleme können sich bei der Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben aus der Tatsache ergeben, dass Bearbeitungsprozesse für diese Aufgaben und deren Resultate in der

308

Regel nicht analysiert werden können, ohne dass zuvor Wissen bezüglich der Bearbeitung dieser Aufgaben vermittelt wurde. Werden in der Lernphase wie in den hier beschriebenen Untersuchungen ausgearbeitete Beispiele zur Wissensvermittlung eingesetzt, stehen sowohl Repräsentationen dieser Beispielaufgaben und ihrer Lösungen als auch bereits gelöste Testaufgaben als potenzielle Quellprobleme für die Bearbeitung weiterer Testaufgaben zur Verfügung. Nur wenn die aus der eigenen Bearbeitung resultierenden potenziellen Quellprobleme eine höhere Salienz aufweisen, z.B. weil es sich um selbst generierte Aufgabenlösungen (*generation effect*; Burns, 1992; Hirshman & Bjork, 1988; Renkl, 2002) handelt oder weil der zeitliche Abstand zwischen der aktuellen Aufgabenbearbeitung und dem Zeitpunkt der „Erstellung“ der Quellproblemrepräsentation gering ist, sollten diese Quellprobleme gegenüber den ausgearbeiteten Beispielen als Quellprobleme bevorzugt werden, und nur in diesem Fall ist mit Sequenzeffekten zu rechnen.

Ist man an der Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung interessiert, bestünde ein Ausweg aus diesem Dilemma theoretisch darin, auf eine Instruktionsphase zu verzichten, so dass Sequenzeffekte wahrscheinlicher werden. Eigene Voruntersuchungen mit Algebraaufgaben, die im Rahmen des Experimentalpsychologischen Praktikums (WS00/01) an der Universität Göttingen durchgeführt wurden, belegen jedoch, dass ein Verzicht auf eine Lernphase bei Verwendung einer studentischen Stichprobe in Bodeneffekten hinsichtlich der resultierenden Problemlöseperformanz resultiert, die eine Untersuchung von Sequenzeffekten unmöglich machen. Bei den verwendeten Aufgaben handelte es sich um Aufgaben, wie sie auch in den hier berichteten Experimenten eingesetzt wurden und die hinsichtlich der gestellten Anforderungen ungefähr der achten Gymnasialklassenstufe entsprechen. Auf Grund dieser Vorerfahrungen wurde auch in den beiden hier berichteten Experimentalserien jeweils eine Lernphase implementiert.

Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sequenzeffekten zu erhöhen, könnte man in nachfolgenden Untersuchungen den zeitlichen Abstand zwischen der Lernphase und der eigentlichen Testphase so weit vergrößern, dass der Einfluss der Lernbeispiele gegenüber den Testaufgaben reduziert wird. Darüber hinaus kann auf eine beispielbasierte Lernphase verzichtet werden, indem man das zur Aufgabenbearbeitung benötigte Wissen abstrakt vermittelt. In diesem Fall reduziert man zumindest die Wahrscheinlichkeit, dass „konkurrierende“ Quellprobleme aus der Lernphase zu einer Verminderung der Sequenzeffekte führen. Schließlich können einfachere

Aufgaben gewählt werden, für die keine Instruktionsphase benötigt wird. Diese müssen jedoch – zumindest wenn man an der Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben interessiert ist – hinreichend schwierig zu sein, um eine Vorwissensabhängigkeit bei der Aufgabenbearbeitung zu erreichen und um eine Überprüfung bestimmter Modellannahmen wie z.B. nicht-automatische Transferprozesse zuzulassen.

Für eine Fortführung der Untersuchung von Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung ergeben sich auf Grund der bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen folgende Empfehlungen. Es sollte

- eine isolierte Variation der Anordnung zu bearbeitender Aufgaben nach ihrer Komplexität vorgenommen werden,
- zur Kontrolle von Einflüssen aus der Lernphase eine zeitliche Dissoziation der Lernphase und der Testphase vorgenommen, Wissen abstrakt vermittelt oder einfachere Aufgaben verwendet werden,
- eine Erhebung des Vorwissens im Anschluss an eine eventuelle Lernphase stattfinden und es sollten
- Prozessmaße wie z.B. Laut-Denk-Protokollen eingesetzt werden, um eine genauere Analyse und Trennung von bei der Aufgabenbearbeitung stattfindenden Lernprozessen sowie von Transferprozessen durchführen zu können sowie
- performanznahe Vorwissensmaße verwendet werden.

Während diese weiter führenden Untersuchungen dazu dienen sollen, eine zusätzliche empirische Fundierung des entwickelten Rahmenmodells zur Entstehung von Sequenzeffekten zu liefern, besteht ein zweiter Ansatzpunkt für zukünftige Arbeiten in diesem Bereich in einer theoretischen Ausdifferenzierung des Rahmenmodells. Insbesondere wäre es hier wünschenswert, eine vollständige Darstellung des Rahmenmodells innerhalb der kognitiven Architektur ACT (Anderson, 1983; 1993; Anderson & Lebiere, 1998) zu erreichen, welches jedoch eine adäquate Implementation für den Analogiemechanismus und zwar in seinen vielfältigen Funktionen als Lern- sowie als Problemlöse-/Transferprozess in ACT voraussetzen würde. Der aktuelle Stand der Architektur ermöglicht dies jedoch nicht ohne weiteres und wird daher nicht der Vielzahl von Befunden gerecht, die in diesem Forschungsfeld existieren.

Nach diesem Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten zu Sequenzeffekten bei der Aufgabenbearbeitung sollen im nächsten Abschnitt die Befunde zur Sequenzierung von Aufgaben und deren Auswirkungen auf die Problemlöseperformanz zusammengefasst und diskutiert werden.

8.3 Sequenzierung multipler Aufgaben

In der vorliegenden Arbeit wird die Festlegung einer eigenen Bearbeitungsreihenfolge für eine Menge zu bearbeitender Aufgaben als strategische Verhaltenskomponente verstanden, die vor allem eingesetzt wird, um eine als ungeeignet wahrgenommene Aufgabensequenz so zu verändern, dass eine bessere Bearbeitung der Aufgaben möglich ist. Basierend auf dem integrativen Rahmenmodell zur Entstehung von Sequenzeffekten wurde davon ausgegangen, dass das Ziel einer Aufgabensequenzierung vor allem darin besteht, eine günstige Bearbeitungssequenz für zu bearbeitende Aufgaben festzulegen, die dem Problemlöser sowohl Möglichkeiten zum Lernen bei der Aufgabenbearbeitung als auch zur Übertragung von Wissen auf andere Aufgaben eröffnet. In Einklang mit Schoenfeld (1985) kann eine sinnvolle Aufgabensequenzierung zum Beispiel darin bestehen, zunächst eine leicht zu bewältigende Aufgabe zu lösen und erst im Anschluss komplexere Aufgaben zur Bearbeitung auszuwählen, die eine Anwendung des bei der Bearbeitung der einfachen Aufgabe erworbenen Wissens ermöglichen.

Aufgabensequenzierung wurde dabei in Anlehnung an klassische Modelle zum analogen Transfer als invertierter *retrieval*-Prozess konzipiert: Während der *retrieval*-Prozess rückwärts gerichtet verläuft, da ausgehend von dem aktuell zu bearbeitenden Zielproblem im Gedächtnis nach einer mentalen Repräsentation einer gelösten Aufgabe gesucht wird, die der aktuellen möglichst strukturähnlich ist, wird bei der Aufgabensequenzierung dagegen eine vorwärts gerichtete Suche initiiert, die auf die noch zu lösenden Aufgaben ausgerichtet ist. Diese können dabei entweder in ihrer Funktion als potenzielle Quellprobleme analysiert werden, deren noch anzufertigende Lösung für die Bearbeitung einer bislang nicht lösbar erscheinenden Aufgabe genutzt werden kann. In diesem Fall werden vor allem solche Sequenzeffekte strategisch genutzt, die auf Lernprozesse bei der Aufgabenbearbeitung zurückgehen. Andererseits können Aufgaben in ihrer Funktion als potenzielles Zielproblem analysiert werden, auf die das bei der Bearbeitung einer Aufgabe generierte Wissen angewen-

det werden kann. Hier werden vor allem auf Transferprozesse zurückgehende Sequenzeffekte strategisch genutzt.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Fragebogenstudie sowie die experimentellen Untersuchungen wurden durchgeführt, um Aufschluss hinsichtlich folgender Aspekte zu erhalten:

- Problemlöser nutzen eine Aufgabensequenzierung als metakognitive Problemlösestrategie (Untersuchungshypothese 8).
- Dabei reagieren sie sensibel auf die Qualität der vorgegebenen Präsentationsreihenfolge, indem sie lediglich bei einer ungünstigen Präsentationssequenz eine Aufgabensequenzierung vornehmen (Untersuchungshypothese 9).
- Das Sequenzierungsverhalten wird durch das domänenspezifische Vorwissen der Problemlöser moderiert, indem vor allem Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen ein strategisch adaptives Verhalten zeigen, indem sie vor allem bei einer ungünstigen Präsentationssequenz der Aufgaben umsequenzieren (Untersuchungshypothese 10).
- Problemlöser nehmen vor allem dann eine Aufgabensequenzierung vor, wenn oberflächlich unähnliche Aufgaben aufeinander folgen (Untersuchungshypothese 11).
- Performanzbezogene Sequenzierungseffekte werden durch die Qualität der Präsentationssequenz moderiert, indem Leistungsverbesserungen durch eine Umsequenzierung der Aufgaben vor allem dann zu beobachten sein sollten, wenn von einer – für analoge Problemlöseprozesse – ungünstigen Präsentationssequenz abgewichen wird. Dagegen sind bei der Umsequenzierung einer günstigen Präsentationssequenz keine Leistungsvorteile oder aber sogar Performanzeinbußen zu erwarten (Untersuchungshypothese 12).
- Eine Umsequenzierung, die an Oberflächenähnlichkeiten orientiert ist, sollte mit Performanzeinbußen einhergehen, da sie auf der fälschlichen Annahme beruht, dass Oberflächenmerkmale für die Aufgabenlösung relevant sind (Untersuchungshypothese 13).
- Leistungsvorteile einer Aufgabensequenzierung gegenüber dem Beibehalten einer Präsentationssequenz für die Aufgabenbearbeitung sollten erstens nur bei der Umsequenzierung einer ungünstigen Präsentationssequenz und zwei-

tens vor allem für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen nachweisbar sein (Untersuchungshypothese 14).

- Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten haben sowohl einen Einfluss auf das Sequenzierungsverhalten als auch auf performanzbezogene Effekte dieses Sequenzierungsverhaltens (Untersuchungshypothese 15).

In Abschnitt 8.3.1 werden zunächst Befunde zum Sequenzierungsverhalten und dessen Moderation durch das domänenspezifische Vorwissen der Problemlöser sowie durch die Qualität der Präsentationssequenz der zu bearbeitenden Aufgaben diskutiert. In Abschnitt 8.3.2 werden dann Effekte einer Umsequenzierung der Aufgaben auf die Problemlöseperformanz erörtert. Abschnitt 8.3.3 beinhaltet ein kurzes Fazit sowie einen Ausblick auf weiter gehende Untersuchungsfragen.

8.3.1 Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung – Rolle des domänenspezifischen Vorwissens und der Qualität der Präsentationssequenz

In Kapitel 4 wurde dafür argumentiert, dass die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung wesentlich von dem aus der Sicht des Problemlösers mit diesem Vorgehen verbundenen Kosten-Nutzen Verhältnis abhängen sollte. Der antizipierte Nutzen sollte vor allem durch die Überzeugung des Problemlösers geprägt sein, dass die Reihenfolge, mit der multiple Aufgaben bearbeitet werden, einen Einfluss auf die Leistung hat und dass daher Veränderungen in der Bearbeitungssequenz eine Verbesserung der Performanz zur Folge haben können.

Die Ergebnisse der Fragebogenstudie belegen, dass – gemessen an den Selbstauskünften einer studentischen Stichprobe – 93 Prozent der Befragten von der Abhängigkeit der Bearbeitungsleistung von der Aufgabenreihenfolge überzeugt sind. Die überwiegende Mehrzahl der Personen (60 Prozent) würde bei der Bearbeitung mathematischer Aufgaben nicht an der vorgegebenen Präsentationssequenz festhalten und stattdessen Aufgaben zur Bearbeitung in einer bestimmten Reihenfolge auswählen. Ein wesentliches Kriterium sowohl zur Auswahl der ersten Aufgabe als auch zur nachfolgenden Auswahl weiterer Aufgaben stellt dabei die Aufgabenkomplexität dar: 84 Prozent der Aufgabensequenzierer gaben an, als erste Aufgabe diejenige auszuwählen, deren Lösung ihnen am einfachsten erscheint. 58 Prozent berichteten, auch für die weitere Aufgabenbearbeitung jeweils eine einfach erscheinende

de Aufgabe auszuwählen, während eine deutlich kleinere Personengruppe (23 Prozent) angab, sich an strukturellen Ähnlichkeiten zu bereits bearbeiteten Aufgaben zu orientieren. Die Ergebnisse der Fragebogenstudie lieferten damit erste Hinweise, dass Problemlöser über eine positive Einschätzung bezüglich der Existenz von Sequenzeffekten verfügen und dass sie eine Aufgabensequenzierung vornehmen, wobei Aufgabenmerkmale wie die relative Komplexität von Aufgaben sowie die strukturelle Ähnlichkeit für diesen Prozess bedeutsam sein können.

Die Fragebogenstudie konzentrierte sich vor allem auf den mit einer Aufgabensequenzierung verbundenen Nutzen sowie auf die allgemeine Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung, ohne dass mögliche damit verbundene Kosten explizit berücksichtigt wurden. In das Kosten-Nutzen-Kalkül gehen auf der Kostenseite sämtliche Beanspruchungen durch kognitive Prozesse ein, die bei einer Aufgabensequenzierung eingesetzt werden müssen und die bei einem einfachen Beibehalten der Präsentationssequenz für die Bearbeitung der Aufgaben nicht anfallen bzw. weniger aufwändig sind. Betrachtet man die Anforderungen, die sich aus einer Aufgabensequenzierung an den Problemlöser ergeben, können Kosten zum einen aus der Notwendigkeit zur Elaboration und zum Vergleich der Aufgaben resultieren sowie zum anderen aus zusätzlichen Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen.

Um eine Feststellung zu treffen, welche Aufgabe im Vergleich zu anderen einfacher lösbar ist und zwischen welchen der zu bearbeitenden Aufgaben Transferbeziehungen bestehen, müssen diese Aufgaben vor ihrer eigentlichen Bearbeitung soweit im Hinblick auf ihre lösungsrelevanten Merkmale elaboriert werden, dass die relative Komplexität sowie das Ausmaß struktureller Ähnlichkeiten zwischen einer bereits gelösten Aufgabe und noch zu bearbeitenden Aufgaben abgeschätzt werden kann. Hierfür müssen also auch Vergleiche zwischen verschiedenen Aufgaben hinsichtlich ihrer Eignung als potenzielle Quell- oder Zielprobleme durchgeführt werden. Faktisch resultieren diese Prozesse in einer zusätzlichen kognitiven Beanspruchung des Problemlösers und damit aus seiner Sicht in Kosten. Diese Zusatzbeanspruchung kann aber für die anschließende Aufgabenbearbeitung durchaus förderlich sein (*germane cognitive load* nach Sweller et al., 1998), da dann vorgenommene Problemlöseprozesse vermutlich auf präziseren und detaillierteren Aufgabenrepräsentationen beruhen, als wenn die Aufgaben lediglich sequentiell ohne vorangegangene Elaborations- und Vergleichsprozesse bearbeitet werden.

Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen durch eine Aufgabensequenzierung ergeben sich zum einen dadurch, dass der Problemlöser gegebenenfalls memorieren muss, welche Aufgaben er bereits bearbeitet hat und welche nicht. Zum anderen können die Prozesse zur Auswahl einer Aufgabe direkt in zusätzlichen Kosten resultieren, z.B. wenn ein Abweichen von der Präsentationssequenz mit vielen Zusatzentscheidungen bzw. großem Suchaufwand verbunden ist.

Vergleicht man die beiden im Anschluss an die Fragebogenstudie durchgeführten Experimentalserien miteinander, so zeigt sich, dass sich die Häufigkeit, mit der eine eigene Bearbeitungsreihenfolge abweichend von der Präsentationssequenz festgelegt wurde, deutlich zwischen den beiden Experimentalserien unterscheidet. Die Anzahl von Personen, die in den papierbasierten Experimenten zur Sequenzierung von Algebraaufgaben von der Präsentationssequenz abwichen, war nur sehr gering ausgeprägt und daher auch teilweise einer statistischen Analyse nicht zugänglich. In den computerunterstützten Experimenten zur Sequenzierung von Kombinatorikaufgaben fanden sich dagegen in Abhängigkeit von der Präsentationssequenz der Aufgaben verhältnismäßig viele Problemlöser, die die Gelegenheit zur Festlegung einer eigenen Bearbeitungssequenz wahrnahmen.

Für diese Unterschiede im Sequenzierungsverhalten zwischen den beiden Experimentalserien können mindestens zwei Gründe angeführt werden, die sich aus den theoretischen Annahmen zur Aufgabensequenzierung herleiten lassen:

- Erstens kann aus der Sicht der Problemlöser in der Algebra-Experimentalserie der mit einer Aufgabensequenzierung verbundene Nutzen nicht hinreichend groß gewesen sein. Für diese Überlegung spricht, dass aus der Sicht der Problemlöser nach den Ergebnissen der Fragebogenstudie scheinbar eine besonders große Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung dann besteht, wenn die Aufgaben unterschiedlich komplex sind, so dass mit der Bearbeitung einfacherer Aufgaben begonnen werden kann. Bei den Algebra-Experimenten wurde keine experimentelle Manipulation der Aufgabenkomplexität innerhalb der zu bearbeitenden Aufgabenmenge vorgenommen, während bei den Kombinatorik-Experimenten jeder Problemlöser sowohl einfache als auch komplexe Aufgaben zu bearbeiten hatte. Dies kann unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Fragebogenstudie die größere Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung in den Kombinatorik-Experimenten erklären. Dagegen spielen gemäß der Selbstauskünfte der Befragten strukturelle Ähnlichkeiten zwischen den Aufga-

ben, auf die in den Algebra-Untersuchungen fokussiert wurde, bei einer Aufgabensequenzierung gegenüber der relativen Komplexität eine untergeordnete Rolle.

- Zweitens kann vermutet werden, dass sich nicht nur der Nutzen einer Aufgabensequenzierung zwischen den beiden Experimentalserien unterscheidet, sondern auch die damit verbundenen Kosten. Nach dieser Erklärung kann die größere Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung in den computergestützten Experimenten durch die Art des Mediums bedingt sein und zwar insbesondere durch die geringeren Kosten, die mit einer Aufgabensequenzierung verbunden waren. In diesen Experimenten war die Auswahl einer Aufgabe zur Bearbeitung einfach durch Anklicken eines entsprechenden Buttons in der Navigationsleiste der alle Aufgaben enthaltenden Überblicksseite möglich. Dies führte dazu, dass nur noch die zur Bearbeitung ausgewählte Aufgabe auf dem Bildschirm präsentiert wurde, und von dort ausgehend konnte das Lösungsformular für die Aufgabe aufgerufen werden. Welche Aufgaben bereits bearbeitet worden waren, wurde über eine Farbveränderung des Buttons der jeweiligen Aufgabe in der Navigationsleiste signalisiert. Auch in den papierbasierten Experimentalanordnungen wurden die Aufgaben auf einer Überblicksseite präsentiert, von der ausgehend ein Problemlöser Aufgaben auswählen konnte. Um allerdings die Aufgabenstellung der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe zu lesen, musste immer wieder auf die alle Aufgaben enthaltende Überblicksseite zurückgegriffen werden. Der Problemlöser musste sich dementsprechend merken, welche Aufgabe er aktuell bearbeitete und welche Aufgaben er bereits gelöst hatte, während ihm in den computerbasierten Sequenzierungsexperimenten Unterstützung im Hinblick auf diese Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen durch das Untersuchungssetting gewährt wurde. Ein Beibehalten der Präsentationssequenz stellte daher vermutlich in den papierbasierten Experimentalanordnungen das weniger aufwändige und daher grundsätzlich bevorzugte Vorgehen dar.

Zusätzlich kann für die computergestützte Experimentalumgebung vermutet werden, dass ein Sequenzierungsverhalten nicht nur einfacher umsetzbar und daher mit geringeren Kosten verbunden war, sondern dass eine Umsequenzierung dort durch die besondere Art der Informationszugänglichkeit möglicherweise sogar nahe gelegt wurde. Hypertextbasierte Umgebungen wie die Experimentalumgebung HYPERCOMB

ermöglichen eine Art des Informationszugriffs, der eben gerade nicht linear einer vorgegebenen Abfolge folgen muss, sondern stattdessen eine eigenständige Informationssequenzierung und -selektion beinhalten kann (Conklin, 1987; Rouet et al., 1996). Das in entsprechenden Umgebungen über Hyperlinks realisierte Angebot, Informationen zu sequenzieren und zu selektieren, weist somit einen gewissen Aufforderungscharakter (*affordance*, Gibson, 1979) auf, eine Aufgabensequenzierung – abweichend von der durch die Präsentationssequenz nahe gelegten Bearbeitungsreihenfolge – vorzunehmen. Bereits in der Lernphase hatten die Problemlöser die Möglichkeit, sich verschiedene Lerninhalte selbst gesteuert zusammen zu stellen, und die Navigationsprotokolle zeigten, dass sie diese Möglichkeit auch wahrnahmen und daher zum Zeitpunkt der Aufgabenbearbeitung durchaus mit dem Vorgehen einer eigenständigen Informationssequenzierung vertraut waren.

Auf Grund der geringen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung in den Algebra-Experimenten konzentriert sich die weitere Darstellung vor allem auf die in den computerbasierten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse. In Experiment 4 konnte in Übereinstimmung mit den zuvor formulierten Erwartungen gezeigt werden, dass Problemlöser die Gelegenheit zur Aufgabensequenzierung wahrnahmen (Untersuchungshypothese 8) und dass das Sequenzierungsverhalten der Problemlöser an die Qualität der Präsentationssequenz der Aufgaben adaptiert war. Es bestand dort eine besonders große Bereitschaft, von einer ungünstigen Präsentationssequenz für die Bearbeitung der Aufgaben abzuweichen, während sich deutlich weniger Aufgabensequenzierungen für eine a priori als günstig definierte Präsentationssequenz nachweisen ließen (Untersuchungshypothese 9). Problemlöser wählten also vor allem dann eine eigene Bearbeitungsreihenfolge, wenn innerhalb einer Aufgabenkategorie zunächst die komplexere der beiden Aufgaben dargeboten wurde, wobei strukturell unähnliche Aufgabenkategorien aufeinander folgten.

Die ursprünglich in Untersuchungshypothese 10 festgehaltene Vermutung, dass bezüglich der Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung eine Interaktion zwischen der Qualität der Präsentationssequenz und dem domänenspezifischen Vorwissen nachweisbar sein würde, konnte dagegen nicht bestätigt werden. Sowohl Personen mit hohem als auch mit niedrigem Vorwissen wählten überwiegend bei einer ungünstigen Präsentationssequenz eine andere Bearbeitungsreihenfolge und zeigten eine geringere Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung, wenn die Aufgaben in der günstigen Sequenz dargeboten wurden.

Eine Analyse der Art der vorgenommenen Aufgabensequenzierungen unterstreicht die bereits in den Ergebnissen der Fragebogenstudie zum Ausdruck gekommene Bedeutung der relativen Aufgabenkomplexität für die Wahl einer eigenen Bearbeitungsreihenfolge: Sowohl Problemlöser in Experiment 4 als auch in Experiment 6 sequenzierten die Aufgaben so, dass sie die einfachen Aufgaben – ungeachtet möglicher struktureller Ähnlichkeiten zu den komplexen Aufgaben – zu Beginn bearbeiteten. Lediglich für Personen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen, die eine Aufgabensequenzierung in der günstigen Präsentationssequenz vorgenommen hatten, ließ sich diese Präferenz nicht nachweisen. Hier zeichnete sich folglich eine – jedoch auf Grund der stark variablen und teilweise sehr geringen Zellenbesetzungen nur bedingt interpretierbare – Interaktion des Sequenzierungsverhaltens mit dem Vorwissen der Versuchspersonen ab, welche bezüglich der allgemeinen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung nicht nachweisbar gewesen war. Dieser Befund kann dahingehend interpretiert werden, dass Personen mit hohem Vorwissen in der günstigen Präsentationssequenz sich adaptiver verhielten als Sequenzierer der anderen Experimentalbedingungen, indem sie nämlich nicht die relativ globale Strategie verfolgten, ungeachtet bestehender struktureller Ähnlichkeiten zwischen aufeinander folgenden Aufgaben mit der Bearbeitung einfacher Aufgaben zu beginnen. Ihr Sequenzierungsverhalten bestand dagegen nur in sehr geringen Veränderungen der ursprünglichen Präsentationssequenz wie z.B. in Positionsvertauschungen einzelner Aufgaben.

Eine Adaptivität des Sequenzierungsverhaltens an die Qualität verschiedener Präsentationssequenzen konnte dagegen in Experiment 2 zur Sequenzierung von Algebraaufgaben nicht nachgewiesen werden. In diesem Experiment zeigten sich keine Unterschiede im Sequenzierungsverhalten in Abhängigkeit davon, ob eine nach Strukturmerkmalen geblockte Aufgabensequenz mit variierenden Oberflächenmerkmalen oder aber eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Sequenz von Aufgaben unterschiedlicher Aufgabenkategorien dargeboten wurde. Allerdings ist hier unklar, inwieweit das Fehlen entsprechender Unterschiede nicht auch mit der in diesem Experiment insgesamt geringen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung im Sinne eines Bodeneffekts zusammenhängt.

Zusammenfassend ergeben sich auf der Basis dieser Daten erste Hinweise, dass Problemlöser eine Sequenzierung der Aufgaben als Verhaltensoption in Betracht ziehen und dass sie zumindest teilweise sensibel auf die Qualität der vorgegebenen

Präsentationssequenz der zu bearbeitenden Aufgaben reagieren. Die Unterschiede im Sequenzierungsverhalten zwischen den beiden Experimentalserien können dahingehend interpretiert werden, dass die Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung durch die Kosten, die mit einem Abweichen von der vorgegebenen Präsentationssequenz verbunden sind, moderiert wird und umso höher ausgeprägt ist, je geringer vor allem mögliche Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen eingeschätzt werden.

Die aus der Aufgabensequenzierung resultierenden Effekte auf die Problemlöseperformanz werden im Folgenden diskutiert.

8.3.2 Aufgabensequenzierung und Problemlöseperformanz

Auf Grund der geringen Bereitschaft zur Aufgabensequenzierung bei papierbasierter Experimentaldurchführung können auch die durch das Sequenzierungsverhalten verursachten Performanzunterschiede in diesen Experimenten nur bedingt (in Experiment 2) oder auch auf Grund der geringen Zellenbesetzungen überhaupt nicht (in Experiment 3) interpretiert werden. Die Mehrheit der im Folgenden diskutierten Befunde zu Auswirkungen einer Aufgabensequenzierung auf die Problemlöseperformanz beziehen sich daher auf Ergebnisse der computerbasiert durchgeführten Experimente 4 und 6.

Es wurde vermutet, dass durch eine Aufgabensequenzierung sich ergebende Performanzveränderungen sowohl durch das domänenspezifische Vorwissen der Versuchspersonen als auch durch die Qualität der vorgegebenen Präsentationssequenz der Aufgaben moderiert sein würden (Untersuchungshypothese 14). Diese Vorhersage hat sich nur teilweise bestätigen lassen. In Experiment 4 konnte nachgewiesen werden, dass erwartungsgemäß nur Versuchspersonen mit hohem domänenspezifischem Vorwissen von einer Aufgabensequenzierung profitierten, während Sequenzierer mit geringem Vorwissen eher schlechtere Leistungen erbrachten, als diejenigen, die die Präsentationssequenz zur Bearbeitung der Aufgaben beibehielten – dieses Befundmuster war jedoch auf der Ebene der Einzelvergleiche nur schwach ausgeprägt und fand sich auch nur für die Bearbeitungsleistung bei einfachen Aufgaben. In Experiment 6, in dem keine weitere Unterscheidung zwischen verschiedenen Vorwissensgruppen gemacht wurde, fanden sich Leistungsverbesserungen bei der Bearbeitung komplexer Aufgaben, wenn die Problemlöser von der vorgegebenen ungünstigen Präsentationssequenz der Aufgaben abwichen. Die untersuchten Versuchspersonen entsprachen hinsichtlich ihres Vorwissensniveaus eher den Perso-

nen mit hohem Vorwissen aus Experiment 4. Damit ergeben sich erste – statistisch aber nur bedingt reliable – Hinweise, dass eine Aufgabensequenzierung vor allem für Problemlöser mit hohem domänenspezifischem Vorwissen mit Leistungsverbesserungen einhergeht.

Die Annahme, dass eine Aufgabensequenzierung nur bei einem Abweichen von einer ungünstigen Präsentationssequenz zu besseren Problemlöseleistungen führt, nicht aber bei einer Veränderung einer a priori als günstig definierten Sequenz, konnte in Experiment 4 nicht bestätigt werden (Untersuchungshypothese 12). Obwohl die Einschätzung der Qualität der Präsentationssequenz als günstig bzw. ungünstig empirisch bestätigt werden konnte, fanden sich (teilweise vorwissensabhängige) Performanzverbesserungen durch Aufgabensequenzierung unabhängig von dieser Eignung der Präsentationssequenz für die Aufgabenbearbeitung. Damit erwiesen sich die Auswirkungen einer Sequenzierung von Aufgaben als allgemeiner als ursprünglich vermutet. Die mit diesem Vorgehen assoziierten Performanzverbesserungen scheinen weniger damit zusammen zu hängen, dass Problemlöser durch eine Aufgabensequenzierung für die Aufgabenbearbeitung ungeeignete Sequenzen in Bearbeitungssequenzen umwandeln, die es ihnen ermöglichen, vorhandene Transferbeziehungen zwischen Aufgaben besser zu nutzen. Stattdessen liefern die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente erste Hinweise darauf, dass eine Aufgabensequenzierung sowie das mit ihr einhergehende anhaltendere Studium der zu bearbeitenden Aufgaben auf der Überblicksseite in einer tiefer gehenden Aufgabenverarbeitung resultiert, welche ihrerseits zu besseren Problemlöseleistungen führt. Diese intensivere Auseinandersetzung mit den zu bearbeitenden Aufgaben kann beispielsweise in den oben genannten Elaborations- und Vergleichsprozessen bestehen, die der Auswahl einer Aufgabe vorangehen.

Diese Verarbeitungsprozesse sind vermutlich nicht nur im Hinblick auf die Bearbeitungsleistung für die sequenzierten Aufgaben förderlich, sondern unterstützen auch allgemein den Erwerb von Wissen über die zugrunde liegenden Strukturmerkmale der Aufgaben im Sinne eines Lernens bei der Aufgabenbearbeitung. So zeigt die Forschung zum Lernen aus ausgearbeiteten Beispielen, dass durch den Lerner oder Problemlöser vorgenommene Elaborationen der lösungsrelevanten Aufgabenmerkmale (sog. Selbsterklärungen) sowohl die Schemaabstraktion als auch die Problemlöseleistungen bei Aufgaben, die eine Modifikation bekannter Lösungswege erfordern, positiv beeinflusst (Bielaczyc & Recker, 1991; Bielaczyc, Pirolli & Brown,

1994; Chi, 2000; Chi et al., 1989; Chi, de Leeuw, Chiu & LaVanher, 1994; Pirolli & Recker, 1994; Renkl, 1997, 1999). In ähnlicher Weise kann der Vergleich verschiedener Beispiele bzw. Aufgaben den Erwerb abstrakter Aufgabenschemata sowie Transferleistungen fördern (Cummins, 1992; Gick & Holyoak, 1983; Silver, 1981). „By comparing problems that share deep structures but differ in surface structures, novices may come to abstract the crucial problem features that define expert category membership“ (Cummins, 1992, S. 1103). Elaborations- und Vergleichsprozesse, die durchgeführt werden, um eine geeignete Bearbeitungssequenz für die zu lösenden Aufgaben festzulegen, können folglich auch zum Erwerb von Wissen über Strukturmerkmale beitragen, welches von den konkreten Aufgaben abstrahiert. Für diese allgemeine Leistungsförderlichkeit der Aufgabensequenzierung, die sich unabhängig von der vorgegebenen Präsentationssequenz ergeben kann und auch unabhängig davon, ob tatsächlich von der vorgegebenen Präsentationsreihenfolge abgewichen wird oder nicht, gibt es verschiedene empirische Hinweise:

- Erstens kam es in Experiment 4 zu der bereits erwähnten *Unabhängigkeit der Leistungsverbesserungen von der Eignung der vorgegebenen Präsentationssequenz für analoge Transferprozesse*. Das heißt, eine Umsequenzierung der Aufgaben war für verschiedene Performanzmaße mit besseren Problemlöseleistungen assoziiert als die Beibehaltung der Präsentationssequenz für die Bearbeitung der Aufgaben – unabhängig davon, ob es sich um eine günstige oder aber ungünstige Präsentationssequenz handelte.
- Zweitens ergaben sich in Experiment 6 Leistungsverbesserungen allein schon durch die *Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung* gegenüber der Vorgabe einer festen Bearbeitungsreihenfolge. Diese Performanzvorteile waren sowohl beim Problemlösen als auch beim anschließenden Wissenstest, der einen Indikator für die Verfügbarkeit von Kenntnissen über Strukturmerkmale und über Unterschiede zwischen verschiedenen Aufgabenkategorien darstellt, nachweisbar.
- Drittens zeigten in Experiment 2 Versuchspersonen, die die Testaufgaben in einer von der Präsentationssequenz abweichenden Reihenfolge bearbeitet hatten, auch bei den im Anschluss dargebotenen *Transferaufgaben* bessere Problemlöseleistungen. Für eine korrekte Bearbeitung der Transferaufgaben ist – ähnlich wie bei der Beantwortung des Wissenstests – ein tiefer gehendes

Verständnis der relevanten Strukturmerkmale notwendig, um eine Adaption bekannter Lösungsprozeduren vorzunehmen.

- Viertens ergaben sich vor allem in den Experimenten zur Sequenzierung von Kombinatorikaufgaben Hinweise auf eine *Moderation der Sequenzeffekte durch Vorliegen einer Sequenzierungsinstruktion*. Diese in Abschnitt 8.2.2 ausführlich beschriebenen Interaktionen sind dahingehend interpretierbar, dass eine Sequenzierungsinstruktion die Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten als entscheidende Vorbedingung für einen analogen Transfer zwischen aufeinander folgenden Aufgaben fördert. Dies kann dazu führen, dass Sequenzeffekte zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Aufgabensequenz überhaupt nur dann auftreten, wenn eine Sequenzierungsinstruktion vorliegt, da Problemlöser nur dann von den vorliegenden Transferbeziehungen profitieren können.

Insgesamt ergibt sich über die verschiedenen Experimente ein relativ konsistentes Bild, wonach Leistungsvorteile einer Aufgabensequenzierung auf einer Förderung von Elaborations- und Vergleichsprozessen beruhen und damit unabhängig von der vorgegebenen Präsentationssequenz auftreten können. Allerdings gibt es auch Befunde, die darauf hindeuten, dass es zusätzliche, durch die Art der vorgegebenen Präsentationssequenz moderierte Effekte einer Aufgabensequenzierung gibt.

So kam es in Experiment 2 bei der Bearbeitung der zu den Lernbeispielen isomorphen Algebraaufgaben nur dann zu Leistungsvorteilen durch eine Aufgabensequenzierung, wenn die Aufgaben in einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Sequenz dargeboten worden waren. Dagegen zeigten sich keine Performanzunterschiede zwischen Sequenzierern und Beibehaltern, wenn die Aufgaben nach Strukturmerkmalen geblockt präsentiert worden waren.

Erklärbar ist die beobachtete Interaktion zwischen dem Sequenzierungsverhalten der Versuchspersonen einerseits und der Qualität der Präsentationssequenz andererseits durch die Annahme, dass eine Aufgabensequenzierung im Fall der beiden Präsentationssequenzen unterschiedlich motiviert ist:

- Wird im Fall einer nach Oberflächenmerkmalen geblockten Präsentationssequenz eine Sequenzierung der Aufgaben vorgenommen, beruht diese vermutlich darauf, dass die strukturellen Unterschiede zwischen aufeinander folgenden und nur oberflächlich ähnlichen Aufgaben erkannt wurden und dass daher versucht wird, eher strukturell ähnliche Aufgaben nacheinander zu bearbeiten.

Dieser Vermutung entsprechend erbringen Sequenzierer, die die Strukturmerkmale der Aufgaben wenigstens bereits teilweise identifiziert haben, bessere Problemlöseleistungen als Personen, die eine nach Oberflächenmerkmalen geblockte Präsentationssequenz für die Aufgabenbearbeitung beibehalten.

- Dagegen kann eine Aufgabensequenzierung im Fall einer nach Strukturmerkmalen geblockten Präsentationssequenz dadurch motiviert sein, dass Problemlöser die Aufgaben nach vermeintlich relevanten Oberflächenmerkmalen umsortieren. Die Aufgabensequenzierung sollte auf Grund der ihr zugrunde liegenden fehlerhaften Einschätzung hinsichtlich der Bedeutung von Oberflächenmerkmalen für die Aufgabenlösung eher mit schlechten Problemlöseleistungen einhergehen. Diese ursprünglich erwartete Verschlechterung durch eine Aufgabensequenzierung lässt sich allerdings nicht nachweisen, stattdessen ergeben sich keinerlei Performanzunterschiede zwischen Sequenzierern und Beibehaltern (vgl. Untersuchungshypothese 13).

Diese für die Bearbeitung von Algebraaufgaben beobachtete Interaktion zwischen dem Sequenzierungsfaktor und der Präsentationssequenz stützt somit die Annahme einer Wirkung der Aufgabensequenzierung im Sinne der gezielten Nutzung von zwischen Aufgaben bestehenden Transferbeziehungen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Auswirkungen der Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung nicht so beliebig sind, dass sie auch durch andere Maßnahmen, mit der Elaborations- und Vergleichsprozesse angeregt werden, erreicht werden können. So konnte in Experiment 6 nachgewiesen werden, dass eine Vergleichssaufgabe, die vor der eigentlichen Bearbeitung der Aufgaben in fest vorgegebenen Reihenfolgen absolviert werden musste und in der die zu bearbeitenden Aufgaben paarweise hinsichtlich ihrer Nützlichkeit als potenzielle Quellprobleme füreinander wechselseitig beurteilt werden sollten, keinen Sequenzeffekt zu Gunsten einer nach Strukturmerkmalen geblockten Aufgabensequenz hervorrief. Nimmt man an, dass diese Beurteilungsaufgabe in ähnlicher Weise wie die Sequenzierungsinstruktion das Erkennen struktureller Ähnlichkeiten fördert, wäre in diesem Fall der in Experiment 4 mit Sequenzierungsinstruktion nachgewiesene Sequenzeffekt zu erwarten gewesen.

8.3.3 Fazit und Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen liefern erste Evidenz, dass Problemlöser die Möglichkeit zur Aufgabensequenzierung wahrnehmen und

zwar insbesondere dann, wenn die vorgegebene Bearbeitungsreihenfolge eine ungünstige ist. Die Vorgabe einer Instruktion, bei der Problemlöser aufgefordert werden, die Aufgaben vor ihrer Bearbeitung gründlich zu lesen und gegebenenfalls eine eigene Reihenfolge für die Aufgabenbearbeitung zu bestimmen, scheint darüber hinaus dazu zu führen, dass die zu bearbeitenden Aufgaben intensiver im Hinblick auf ihre lösungsrelevanten Merkmale verarbeitet werden. Diese möglicherweise über Elaborations- und Vergleichsprozesse erreichte tiefer gehende Auseinandersetzung mit den Aufgaben bewirkt sowohl Verbesserungen der Problemlöseperformanz als auch Leistungszuwächse bei Maßen, die das Ausmaß des Wissenserwerbs überprüfen. Neben dieser allgemeinen Förderung der Performanz kommt es allerdings auch zu solchen Effekten einer Aufgabensequenzierung, die durch die Qualität der vorgegebenen Präsentationsreihenfolge moderiert werden.

Aus den hier vorgestellten Ergebnissen lassen sich verschiedene Konsequenzen für weiter gehende Untersuchungen zum Sequenzierungsverhalten von Problemlösern und dessen Auswirkungen auf die Problemlöseperformanz ableiten:

- Erstens erscheint es empfehlenswert, bei der Gestaltung des Untersuchungsmaterials darauf zu achten, dass eine Aufgabensequenzierung durch das Untersuchungssetting so weit unterstützt wird, dass ein Abweichen von einer vorgegebenen Präsentationssequenz mit möglichst geringen Kosten verbunden und damit wahrscheinlicher ist.
- Wenn man weniger an der Adaptivität des Sequenzierungsverhaltens und dessen Konsequenzen für die Problemlöseperformanz interessiert ist, sondern eher dem Einfluss möglicher Kosten-Nutzen-Kalkulationen nachgehen möchten, ist es zweitens darüber hinaus sinnvoll, mögliche Einflussfaktoren für dieses Kalkül systematisch zu variieren. Beispielsweise können instruktionale Manipulationen eingesetzt werden, um die Einschätzung des Nutzens einer Aufgabensequenzierung zu beeinflussen wie z.B. durch Vergabe von Informationen über potenzielle Transferbeziehungen zwischen Aufgaben oder über die Existenz von Sequenzeffekten. Systematische Manipulationen des Kostenfaktors ergeben sich beispielsweise aus Variationen der Art der Aufgabenpräsentation bzw. des Ausmaßes an Unterstützung bei Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen, die im Hinblick auf eine Aufgabensequenzierung gewährt werden. Es ist auch denkbar, dass diese Manipulationen Auswirkungen auf die mit einer Aufgabensequenzierung assoziierte Problemlöseperformanz haben. Bei-

spielsweise können Umsequenzierungen, die trotz hoher Gedächtnis- und Steuerungsanforderungen vorgenommen werden, zu Leistungsver schlechterungen führen, da nicht mehr hinreichend kognitive Ressourcen für die Aufgabenbearbeitung zur Verfügung stehen.

- Drittens erscheint es hier ebenso wie bei der Untersuchung von Sequenzeffekten sinnvoll, detailliertere Prozessmaße z.B. über Laut-Denk-Protokolle (Ericsson & Simon, 1993) zu erheben. Insbesondere vermögen es diese Maße, Aufschluss hinsichtlich der folgenden Fragen zu geben: (1) Welche Ziele verbinden Problemlöser mit einer Umsequenzierung der Aufgaben? (2) Welche Aufgabenmerkmale werden bei der Wahl einer eigenen Bearbeitungsreihenfolge mit einbezogen? (3) Welche kognitiven Prozesse (z.B. Elaborations- oder Vergleichsprozesse) sind bedeutsam im Hinblick auf Leistungsverbesserungen, die mit einer Aufgabensequenzierung einhergehen, und wie unterscheiden sich diese möglicherweise von denjenigen Prozessen, die bei anderen Maßnahmen zur Förderung der Wahrnehmung struktureller Ähnlichkeiten zu beobachten sind? Insbesondere eine Beantwortung der letzten Frage würde es erlauben, für eine Aufgabensequenzierung spezifische und unspezifische Wirkkomponenten, die potentielle Leistungsverbesserungen verursachen können, zu identifizieren.
- Viertens gibt es bislang nur unzureichende Daten bezüglich der Moderation von Sequenzierungseffekten durch das Vorwissen der Versuchspersonen. Während die überwiegende Mehrzahl der hier vorgestellten Befunde auf eine leistungsförderliche Beeinflussung der Problemlöseperformanz durch Aufgabensequenzierung verweist, gibt es auch vereinzelte Hinweise, dass eine Aufgabensequenzierung für Personen mit niedrigem Vorwissen auch mit Leistungsver schlechterungen einhergehen kann. Diesem Befund sollte genauer nachgegangen werden, insbesondere dann, wenn an eine instruktionale Nutzung von Sequenzierungsinstruktionen gedacht ist.

8.4 Fazit zu Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben

Für die Untersuchung von Sequenz- und Sequenzierungseffekten bei der Bearbeitung voraussetzungsreicher Aufgaben wurde ein Modell entwickelt, für dessen An-

nahmen in den eigenen Untersuchungen erste Evidenz gesammelt wurde. Die hier vorgestellte Arbeit beansprucht keineswegs, endgültige Antworten für die aufgeworfenen Fragen zu liefern, sondern versteht sich eher als Ausgangspunkt für die theoretische Analyse und experimentelle Untersuchung eines bislang in der kognitions-wissenschaftlichen Forschung zu Unrecht vernachlässigten Themas. Die sehr breit angelegte Analyse des Phänomens, die unter anderem auf einer Betrachtung von Sequenzeffekten für die in dieser Arbeit nicht untersuchten voraussetzungsarmen Aufgaben beruht, sollte es dabei ermöglichen, in zukünftigen Untersuchungen verschiedenen, vor allem aus einer grundlagenwissenschaftlich orientierten Perspektive interessanten Hypothesen nachzugehen. Der Versuch, in der vorliegenden Arbeit eine Vielzahl der in dem Rahmenmodell enthaltenen Annahmen einer ersten Überprüfung zu unterziehen, birgt zwar den Nachteil, dass den Fragestellungen nicht immer im nötigen Detail nachgegangen werden konnte. Auf der anderen Seite konnte mit dieser Vorgehensweise für verschiedene Aspekte des aufgestellten Modells erste Evidenz gesammelt werden, die durchaus hinreichend viel versprechend erscheinen, um an diesem Forschungsthema weiter zu arbeiten.

Ein Bestreben der Arbeit war es im Hinblick auf die theoretische Analyse, eine einheitliche Beschreibung für Sequenzeffekte aus den unterschiedlichsten Untersuchungsparadigmen zu erreichen, bei der vor allem die Ähnlichkeit der verschiedenen Erklärungsansätze herausgearbeitet werden sollte. Gerade die für Sequenzeffekte bei voraussetzungsreichen Aufgaben identifizierten Erklärungsansätze können dabei gut im Rahmen der umfassenden kognitiven Architektur ACT-R (Anderson & Lebiere, 1998) dargestellt werden, von deren hohem Präzisionsgrad sie deutlich profitieren können. Umgekehrt zeigt der Versuch der Nutzung von ACT-R zur Beschreibung der Entstehung von Sequenzeffekten für voraussetzungsreiche Aufgaben bestimmte Defizite der Architektur im Hinblick auf die Darstellung von Analogie als zentralem kognitiven Mechanismus auf, die dem angestrebten Status als *unified theory of cognition* (Newell, 1990) noch im Wege stehen. Die Beseitigung dieser Defizite erscheint aber durchaus ohne gravierende Veränderungen der Architektur möglich. Hierzu stehen eine Reihe empirischer Befunde zur Funktionsweise und zu Bedingungen analoger Lern- und Problemlösemechanismen zur Verfügung, die nicht nur auf einer für die kognitive Modellierung relativ ungeeigneten phänomenologischen Ebene angesiedelt sind, sondern durchaus auf bereits sehr detaillierten Prozessannahmen beruhen.

Das Bestreben nach Vereinheitlichung verschiedener Erklärungsansätze scheint aus der Sicht der Autorin in der kognitiven Psychologie durchaus wünschenswert zu sein, um einer immer stärker zunehmenden Ausdifferenzierung von Theorien und Modellen zu kognitiven Phänomenen entgegenzuwirken, die ohne Bezug zu anderen Forschungsarbeiten isoliert für einzelne Befundmuster entwickelt werden. Hier können sich kognitive Architekturen mit ihrer Integrationsfunktion als sehr hilfreich erweisen, um eine Vielzahl unterschiedlicher Phänomene mit einer begrenzten Anzahl kognitiver Mechanismen zu beschreiben und zu erklären. Unter anderem kann damit dem vor allem in der kognitiven Psychologie evidenten *scaling up*-Problem begegnet werden, wonach Erklärungsansätze für verwandte Phänomene auf unterschiedlichen Auflösungsebenen unverbunden nebeneinander stehen (vgl. Gerjets, Scheiter & Schorr, in press). Die Erklärung von Sequenzeffekten in einem einheitlichen Rahmenmodell und zwar für Aufgaben, die von elementaren Reiz-Reaktions-Aufgaben im Millisekundenbereich bis hin zu mathematischen Problemlöseaufgaben reichen, soll einen Versuch darstellen, diesem *scaling-up*-Problem entgegen zu wirken.

9. Literaturverzeichnis

- Allport, A., Styles, E. A. & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umiltà & M. Moscovitch (Eds.), *Attention and performance XV* (pp. 421-452). Cambridge, MA: MIT Press.
- Altmann, E. M. & Gray, W. D. (2000). An integrated model of set shifting and maintenance. In N. Taatgen & J. Aasman (Eds.), *Proceedings of the 3rd international conference on cognitive modeling* (pp. 17-24). Veenendaal: Universal Press.
- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89, 369-406.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R., Farrell, R. & Sauers, R. (1984). Learning to program in LISP. *Cognitive Science*, 8, 87-129.
- Anderson, J. R. & Fincham, J. M. (1994). Acquisition of procedural skills from examples. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 1322-1340.
- Anderson, J. R., Fincham, J. M. & Douglass, S. (1997). The role of examples and rules in the acquisition of a cognitive skill. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 932-945.
- Anderson, J. R. & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R. & Schunn, C. D. (2000). Implications of the ACT-R learning theory: no magic bullets. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology* (Vol. 5, pp. 1-33). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R. & Thompson, R. (1989). Use of analogy in a production system architecture. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 367-397). New York: Cambridge University Press.
- Andre, A. D., Heers, S. T. & Cashion, P. A. (1995). Effects of workload preview on task scheduling during simulated instrument flight. *The International Journal of Aviation Psychology*, 5, 5-23.
- Anzai, Y. & Simon, H. A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86, 124-140.
- Atkinson, R. K., Derry, S. A., Renkl, A. & Wortham, D. (2000). Learning from examples: Instructional principles from the worked examples research. *Review of Educational Research*, 70, 181-214.
- Atwood, M. E. & Polson, P. G. (1976). A process model for water jug problems. *Cognitive Psychology*, 8, 191-216.
- Baker, K. R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. New York: Wiley.
- Barab, S. A., Bowdish, B. E., Young, M. F. & Owen, S. V. (1996). Understanding kiosk navigation: Using log files to capture hypermedia searches. *Instructional Science*, 24, 377-395.

- Bassok, M. & Holyoak, K. J. (1989). Interdomain transfer between isomorphic topics in algebra and physics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 153-166.
- Beach, L. R. & Mitchell, T. R. (1978). A contingency model for the selection of decision strategies. *Academy of Management Review*, *3*, 439-449.
- Bielaczyc, K., Pirolli, P. L. & Brown, A. L. (1995). Training in self-explanation and self-regulation strategies: Investigating the effects of knowledge acquisition activities on problem solving. *Cognition & Instruction*, *13*, 221-252.
- Blanchette, I. & Dunbar, K. (2002). Representational change and analogy: How analogical references alter target representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*, 672-685.
- Blessing, S. B. & Ross, B. H. (1996). Content effects in problem categorization and problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 792-810.
- Brown, A. L. (1978). Knowing when, where, and how to remember: A problem of metacognition. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology* (Vol. 1, pp. 77-165). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Brown, A. L., Bransford, J., Ferrara, R. & Campione, J. (1983). Learning, remembering and understanding. In J. H. Flavell & E. Markman (Eds.), *Handbook of child psychology*. (Vol. 3, pp. 77-166). New York: Wiley.
- Brown, J. L. (1970). Effects of logical and scrambled sequences in mathematical materials on learning with programmed instruction materials. *Journal of Educational Psychology*, *61*, 41-45.
- Buckland, P. R. (1968). The ordering of frames in a linear program. *Programmed Learning and Educational Technology*, *5*, 197-205.
- Carbonell, J. G. (1986). Derivational analogy: A theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition. In R. Michalski, J. G. Carbonell & T. M. Mitchell (Eds.), *Machine Learning: An artificial intelligence approach* (Vol. 2, pp. 371-392). Los Altos, CA: Morgan Kaufmann.
- Catrambone, R. (1994). Improving examples to improve transfer to novel problems. *Memory & Cognition*, *22*, 606-615.
- Catrambone, R. (1995). Aiding subgoal learning: Effects on transfer. *Journal of Educational Psychology*, *87*, 5-17.
- Catrambone, R. (1996). Generalizing solution principles learned from examples. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 1020-1031.
- Catrambone, R. (1998). The subgoal learning model: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 355-376.
- Catrambone, R. (2002). The effects of surface and structural feature matches on the access of story analogs. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*, 318-334.
- Catrambone, R. & Holyoak, K. J. (1989). Overcoming contextual limitations on problem-solving transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 1147-1156.

- Chase, W. G. & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Chen, Z. (2002). Analogical problem solving: A hierarchical analysis of procedural similarity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 81-98.
- Chi, M. T. H. (2000). Self-explaining expository texts: The dual processes of generating inferences and repairing mental models. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology* (Vol. 5, pp. 161-238). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Chi, M. T. H., Bassok, M., Lewis, M. W., Reimann, P. & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 142-182.
- Chi, M. T. H., De Leeuw, N., Chiu, M.-H. & LaVancher, C. (1994). Eliciting self-explanations improves understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J. & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M. T. H., Glaser, R. & Rees, E. (1982). Expertise in problem solving. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 1, pp. 1-75). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Christensen-Szalanski, J. J. (1980). A further examination of the selection of problem-solving strategies: The effects of deadlines and analytic aptitudes. *Organizational Behavior and Human Performance*, 25, 107-122.
- Christensen-Szalanski, J. J. (1998). Problem-solving strategies: A selection mechanism, some implications, and some data. In L. R. Beach (Ed.), *Image theory: Theoretical and empirical foundations* (pp. 159-175). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Clement, C. A. & Gentner, D. (1991). Systematicity as a selection constraint in analogical mapping. *Cognitive Science*, 15, 89-132.
- Collins, A., Brown, J. S. & Newman, S. E. (1989). Cognitive apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics. In L. B. Resnick (Ed.), *Knowing, learning, and instruction* (pp. 453-494). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Conklin, J. (1987). Hypertext: An introduction and survey. *IEEE Computer*, 20, 17-41.
- Cooper, G. & Sweller, J. (1987). Effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer. *Journal of Educational Psychology*, 79, 347-362.
- Cummins, D. D. (1992). Role of analogical reasoning in the induction of problem categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 1103-1124.
- Cummins, D. D., Kintsch, W., Reusser, K. & Weimer, R. (1988). The role of understanding in solving word problems. *Cognitive Psychology*, 20, 405-438.
- Day, R. H. (1956). Relative task difficulty and transfer of training in skilled performance. *Psychological Bulletin*, 53, 160-168.
- DeGroot, A. D. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague: Mouton.
- De Jong, R. (2001). Adult age difference in goal activation and goal maintenance. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 71-89.

- De Jong, R., Berendsen, E. & Cools, R. (1999). Goal neglect and inhibitory limitations: Dissociable causes of interference effects in conflict situations. *Acta Psychologica*, 101, 379-394.
- Derry, S. J. (1989). Strategy and expertise in solving word problems. In C. B. Gormick, G. Miller & M. Pressley (Eds.), *Cognitive strategy research: From basic research to educational applications* (pp. 269-302). New York: Springer.
- Dörner, D. (1989). *Die Logik des Mißlingens*. Reinbek: Rowohlt.
- Duncker, K. (1935). *Zur Psychologie des produktiven Denkens*. Berlin: Springer.
- Ellis, H. C. (1965). *The transfer of training*. New York: The Macmillan Company.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data* (revised ed.). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Faries, J. M. & Reiser, B. (1988). Access and use of previous solutions in a problem solving situation. In *Proceedings of the 10th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 433-439). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Fikes, R., Hart, P. E. & Nillson, N. J. (1972). Learning and executing generalized robot plans. *Artificial Intelligence* 3, 251-288.
- Fitts, P. M. & Posner, M. I. (1967). *Learning and skilled performance in human performance*. Belmont, CA: Brock-Cole.
- Flavell, J. H. (1984). Annahmen zum Begriff der Metakognition sowie zur Entwicklung von Metakognition. In F. E. Weinert & R. H. Kluwe (Hrsg.), *Metakognition, Motivation und Lernen* (S. 23-31). Stuttgart: Kohlhammer.
- Flavell, J. H. & Wellman, H. M. (1977). Metamemory. In R. V. Kail, Jr. & J. W. Hagen (Eds.), *Perspectives on the development of memory and cognition* (pp. 3-33). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Forbus, K. D., Gentner, D. & Law, K. (1995). MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval. *Cognitive Science*, 19, 141-205.
- Fried, L. S. & Holyoak, K. J. (1984). Induction of category distributions: A framework for classification learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 10, 234-257.
- Gagné, R. M. (1962). The acquisition of knowledge. *Psychological Review*, 69, 355-365.
- Gagné, R. M. (1965). *The conditions of learning*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Gagné, R. M. & Paradise, N. E. (1961). Abilities and learning sets in knowledge acquisition. *Psychological Monographs*, 75, 1-23.
- Gentner, D. (1983). Structure mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou, A. Ortony (Eds), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 199-241). Cambridge. CA: University Press.
- Gentner, D. (1999). Analogy. In R. A. Wilson & F. C. Keil (Eds.), *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences* (pp. 17-20). Cambridge, MA: The MIT Press.

- Gentner, D. & Landers, R. (1985, November). *Analogical reminding: A good match is hard to find*. Paper presented at the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tuscon, Arizona.
- Gentner, D. & Markman, A. B. (1994). Structural alignment in comparison: No difference without similarity. *Psychological Science*, 5, 152.
- Gentner, D. & Markman, A. B. (1997). Structure mapping in analogy and similarity. *American Psychologist*, 52, 45-56.
- Gentner, D., Rattermann, M. J. & Forbus, K. D. (1993). The roles of similarity in transfer: Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25, 524-575.
- Gentner, D. & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, 10, 277-300.
- Gerjets, P. & Scheiter, K. (2003). Goal configurations and processing strategies as moderators between instructional design and cognitive load: Evidence from hypertext-based instruction. *Educational Psychologist*, 38, 33-41.
- Gerjets, P., Scheiter, K. & Tack, W. H. (2000). Ressource-adaptive selection of strategies in learning from worked-out examples. In L. R. Gleitman & A. K. Joshi (Eds.), *Proceedings of the 22nd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 161-171). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Gerjets, P., Scheiter, K. & Tack, W. H. (2002). *Strategies of comparing instructional examples in hypertext environments: Are multiple examples really necessary for schema acquisition?* (Manuskript eingereicht zur Publikation)
- Gerjets, P., Scheiter, K. & Schorr, T. (in press). Modeling processes of volitional action control in multiple-task performance: How to explain effects of goal competition and task difficulty on processing strategies and performance within ACT-R. *Cognitive Science Quarterly*.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12, 306-355.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1987). The cognitive basis of transfer. In S. M. Cormier & J. D. Hagman (Eds.), *Transfer of learning* (pp. 9-46). San Diego, CA: Academic Press.
- Gick, M. L. & Paterson, K. (1992). Do contrasting examples facilitate schema induction and analogical transfer? *Canadian Journal of Psychology*, 46, 539-550.
- Glassman, W. E. & Levine, M. (1972). Unsolved- and insoluble-problem behavior. *Journal of Experimental Psychology*, 92, 146-148.
- Gray, W. D. & Orasanu, J. M. (1987). Transfer of cognitive skills. In S. M. Cormier & J. D. Hagman (Eds.), *Transfer of learning* (pp. 183-215). San Diego, CA: Academic Press.

- Greeno, J. G. (1978). Natures of problem-solving abilities. In Estes, W. K. (Ed), *Handbook of learning & cognitive processes: V. Human information* (pp. 239-270). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hardiman, P. T., Dufresne, R. & Mestre, J. P. (1989). The relation between problem categorization and problem solving among experts and novices. *Memory & Cognition*, 17, 627-638
- Hart, S. G. (1989). Crew workload-management strategies: A critical factor in system performance. In R. S. Jensen (Ed.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 22-27). Columbus: Ohio State University.
- Hasselhorn, M. & Mähler, C. (2000). Transfer: Theorien, Technologien und empirische Erfassung. In W. Hager, J.-L. Patry & H. Brezing (Hrsg.), *Evaluation psychologischer Interventionsmaßnahmen* (S. 86-101). Bern: Huber.
- Hayes-Roth, B. & Hayes-Roth, F. (1979). A cognitive model of planning. *Cognitive Science*, 3, 275-310.
- Hayes, J. R. & Simon, H. A. (1977). Psychological differences among problem isomorphs. In N. J. Castellan, D. B. Pisoni & G. R. Potts (Eds.), *Cognitive theory* (pp. 21-44). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hesse, F. W. (1991a). Analoges Problemlösen. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Hesse, F. W. (1991b). Search and acceptance in analogical problem solving. *Zeitschrift für Psychologie*, 199, 235-242.
- Hesse, F. W. & Hahn, C. (1994). Die Rolle der Kontextähnlichkeit beim analogen Problemlösen. *Sprache & Kognition*, 13, 90-102.
- Hesse, F. W. & Klecha, D. (1990). Use of analogies in problem solving. *Computers in Human Behavior*, 6, 115-129.
- Heydenbluth, C. & Hesse, F. W. (1996). Impact of superficial similarity in the application phase of analogical problem solving. *American Journal of Psychology*, 109, 37-57.
- Hinsley, D. A., Hayes, J. R. & Simon, H. A. (1977). From words to equations: Meaning and representation in algebra word problems. In M. A. Just & P. A. Carpenter (Eds.), *Cognitive processes in comprehension* (pp. 89-105). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Holyoak, K. J. (1985). The pragmatics of analogical transfer. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 59-87). New York: Academic Press.
- Holyoak, K. J. & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15, 332-340.
- Holyoak, K. J., Novick, L. R. & Melz, E. R. (1994). Component processes in analogical transfer: Mapping, pattern completion, and adaptation. In K. J. Holyoak & J. A. Barnden (Eds.), *Analogical connections* (pp. 113-180). Norwood, NJ: Ablex.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. R. (1989a). A computational model of analogical problem solving. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 242-266). Cambridge, CA: Cambridge University Press.

- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1989b). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, 13, 295-355.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1997). The analogical mind. *American Psychologist*, 52, 35-44.
- Jelsma, O., Van Merriënboer, J. J. G. & Bijlstra, J. P. (1990). The ADAPT design model: Towards instructional control of transfer. *Instructional Science*, 19, 89-120.
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology*, 89.
- Jones, R. M. & Langley, P. (1995). Retrieval and learning in analogical problem solving. In Cognitive Science Society (Ed.), *Proceedings of the 17th Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 466-471). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122-149.
- Keane, M. (1987). On retrieving analogues when solving problems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39, 29-41.
- Keane, M., Ledgeway, T. & Duff, S. (1994). Constraints on analogical mapping: A comparison of three models. *Cognitive Science*, 18, 387-438.
- Kieras, D. E. & Bovair, S. (1986). The acquisition of procedures from text: A production-system analysis of transfer of training. *Journal of Memory and Language*, 25, 507-524.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. New York: Cambridge University Press.
- Kintsch, W. & Greeno, J. G. (1985). Understanding and solving word arithmetic problems. *Psychological Review*, 92, 109-129.
- Kluwe, R. (1997). Intentionale Steuerung kognitiver Prozesse. *Kognitionswissenschaft*, 6, 53-69.
- Kluwe, R. H. & Friedrichsen, G. (1985). Mechanisms of control and regulation in problem solving. In J. Kuhl & J. Beckmann (Eds.), *Action control: From cognition to behavior* (pp. 183-218). Berlin: Springer.
- Koedinger, K. R. & Anderson, J. R. (1990). Abstract planning and perceptual chunks: Elements of expertise in geometry. *Cognitive Science*, 14, 511-550.
- Kolodner, J. L. (1992). An introduction to case-based reasoning. *Artificial Intelligence Review*, 6, 3-34.
- Kolodner, J. L. (1993). *Case-based reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Kolodner, J. L. (2002). The "neat" and the "scruffy" in promoting learning from analogy: We need to pay attention to both. *The Journal of the Learning Sciences*, 11, 139-152.
- Kotovsky, K., Hayes, J. R. & Simon, H. A. (1985). Why are some problems hard? Evidence from the Tower of Hanoi. *Cognitive Psychology*, 17, 248-294.
- Kramer, A. F., Hahn, S. & Gopher, D. (1999). Task coordination and aging: Explorations of executive control processes in the task switching paradigm. *Acta Psychologica*, 101, 339-378.

- LeFevre, J.-A. & Dixon, P. (1986). Do written instructions need examples? *Cognition & Instruction*, 3, 1-30.
- Levin, G. R. & Baker, B. L. (1963). Item scrambling in a self-instructional program. *Journal of Educational Psychology*, 54, 138-143.
- Levine, M. (1975). *A cognitive theory of learning: Research on hypothesis testing*. Hillsdale: NJ: Erlbaum.
- Li, K. Z. H., Lindenberger, U., Rüniger, D. & Frensch, P. A. (2000). The role of inhibition in the regulation of sequential action. *Psychological Science*, 11, 343-347.
- Loftus, E. F. & Suppes, P. (1972). Structural variables that determine problem-solving difficulty in computer-assisted instruction. *Journal of Educational Psychology*, 63, 531-542.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527.
- Lovett, M. C. & Anderson, J. R. (1996). History of success and current context in problem solving: Combined influences on operator selection. *Cognitive Psychology*, 31, 168-217.
- Luchins, A. S. (1942). Mechanization in problem solving. *Psychological Monographs*, 54, 1-95.
- Luchins, A.S. & Luchins, E. H. (1959). *Rigidity of behavior*. Oregon: University of Oregon Books.
- Lüer, G. & Spada, H. (1990). Denken und Problemlösen. In H. Spada (Hrsg.), *Lehrbuch der Allgemeinen Psychologie* (S. 189-280). Bern: Huber.
- MacCarthy, B. L. & Wilson, J. R. (Eds.) (2001). *Human performance in planning and scheduling*. London: Taylor & Francis.
- Mackie, J. L. (1974). *The cement of the universe*. New York: Oxford University Press.
- Marcus, N., Cooper, M. & Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, 88, 49-63.
- Markman, A. (1997). Constraints on analogical inference. *Cognitive Science*, 21, 373-418.
- Marshall, S. P. (1995). *Schemas in problem solving*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (1981). Frequency norms and structural analysis of algebra story problems into families, categories, and templates. *Instructional Science*, 10, 133-175.
- Mayer, R. E. & Wittrock, M. C. (1996). Problem-solving transfer. In D. C. Berliner & R. C. Calfee (Eds.), *Handbook of educational psychology* (pp. 47-62). New York: Simon & Schuster Macmillan.
- Mayr, U. & Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: The role of backward inhibition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129, 4-26.
- Medin, D. L. & Ross, B. H. (1989). The specific character of abstract thought: Categorization, problem solving, and induction. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 5, pp. 189-223). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Meiran N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, 1423-1442.
- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple task performance: Part 1. Basic mechanisms. *Psychological Review*, 104, 3-65.
- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1998). Precis to a practical unified theory of cognition and action: Some lessons from EPIC computational models of human multiple-task performance. In D. Gopher & A. Koriat (Eds.), *Attention and performance XVII: Regulation of performance: Interaction of theory and application* (pp. 17-88). Cambridge, MA: MIT Press.
- Michener, D. R. (1978). Understanding mathematics. *Cognitive Science*, 2, 361-383.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. & Wager, T. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100.
- Moray, N., Dessouky, M., Kijowski, B. A. & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Nathan, M. J., Kintsch, W. & Young, E. (1992). A theory of algebra-word-problem comprehension and its implications for the design of learning environments. *Cognition and Instruction*, 9, 329-389.
- Newell, A. (1990). *Unified theories of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (pp. 1-55). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Newell, A., Shaw, J. C. & Simon, H. A. (1958). Chess-playing programs and the problem of complexity. *IBM Journal of Research and Development*, 2, 320-335.
- Newell, A. & Simon, H. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Niedermeyer, F.C., Brown, J. & Sulzen, R. (1969). Learning and varying sequences of ninth-grade mathematics material. *Journal of Experimental Education*, 37, 61-66.
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (Vol. 4, pp. 1-18). New York: Plenum Press.
- Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14, 510-520.
- Novick, L. R. (1995). Some determinants of successful analogical transfer in the solution of algebra word problems. *Thinking and Reasoning*, 1, 5-30.

- Novick, L. R. & Holyoak, K. J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 398-415.
- Oesterreich, R. (1981) *Handlungsregulation und Kontrolle*. München: Urban & Schwarzenberg.
- Ortony, A. (1979). Beyond literal similarity. *Psychological Review*, 86, 161-180.
- Paas, F. G. W. C. & van Merriënboer, J. J. G. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Payne, J. W., Bettman, J. R. & Johnson, E. J. (1988). Adaptive strategy selection in decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14, 534-552.
- Payne, J. W., Bettman, J. R. & Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge: University Press.
- Pennington, N. & Rehder, B. (1995). Looking for transfer and interference. In D. L. Medin (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 33, pp. 223-289). San Diego, CA: Academic Press.
- Perfetto, G. A., Bransford, J. D. & Franks, J. J. (1983). Constraints on access in a problem solving context. *Memory & Cognition*, 11, 24-31.
- Pirolli, P. & Anderson, J. R. (1985). The role of learning from examples in the acquisition of recursive programming skills. *Canadian Journal of Psychology*, 39, 240-272.
- Pirolli, P. & Recker, M. (1994). Learning strategies and transfer in the domain of programming. *Cognition and Instruction*, 12, 235-275.
- Polya, G. (1949). *Schule des Denkens*. Bern: Francke Verlag.
- Posner, G. J. & Strike, K. A. (1976). A categorization scheme for principles of sequencing content. *Review of Educational Research*, 46, 665-690.
- Quilici, J. L. & Mayer, R. E. (1996). Role of examples in how students learn to categorize statistics word problems. *Journal of Educational Psychology*, 88, 144-161.
- Ranzijn, F. J. A. (1991). The number of video examples and the dispersion of examples as instructional design variables in teaching concepts. *Journal of Experimental Education*, 59, 320-330.
- Read, S. J. & Johnson, R. W. (1996). Improving the use of analogies by learning to encode their causal structure. In G. W. Cottrell (Ed.), *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 644-648). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Reed, S. K. (1984). Estimating answers to algebra word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 778-790.
- Reed, S. K. (1987). A structure-mapping model for word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 124-139.
- Reed, S. K., Ackinclose, C. C. & Voss, A. A. (1990). Selecting analogous problems: Similarity versus inclusiveness. *Memory & Cognition*, 18, 83-98.

- Reed, S. K. & Bolstad, C. A. (1991). Use of examples and procedures in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 753-766.
- Reed, S. K., Dempster, A. & Ettinger, M. (1985). Usefulness of analogous solutions for solving algebra word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 11, 106-125.
- Reed, S. K., Ernst, G. & Banerji, R. (1974). The role of analogy in similar problem states. *Cognitive Psychology*, 6, 436-456.
- Reed, S. K., Willis, D. & Guarino, J. (1994). Selecting examples for solving word problems. *Journal of Educational Psychology*, 56, 380-388.
- Reeves, L. M. & Weisberg, R. W. (1994). The role of content and abstract information in analogical transfer. *Psychological Bulletin*, 115, 381-400.
- Reimann, P. (1997). *Lernprozesse beim Wissenserwerb aus Beispielen: Analyse, Modellierung, Förderung*. Bern: Huber.
- Reimann, P. & Chi, M.T.H. (1989). Expertise in complex problem solving. In K. J. Gilhooly (Ed.), *Human expertise, human and machine problem solving* (pp. 161-192). New York: Plenum Press.
- Reimann, P. & Schult, T. J. (1996). Turning examples into cases: Acquiring knowledge structures for analogical problem solving. *Educational Psychologist*, 31, 123-132.
- Renkl, A. (1997). Learning from worked-out examples: A study on individual differences. *Cognitive Science*, 21, 1-29.
- Renkl, A. (1999). Learning mathematics from worked-out examples: Analyzing and fostering self-explanations. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 477-488.
- Renkl, A., Atkinson, R. K., Maier, U. H., & Staley, R. (2002). From example study to problem solving: Smooth transitions help learning. *Journal of Experimental Education*, 70, 293-315.
- Renkl, A., Mandl, H. & Gruber, H. (1996). Inert knowledge: Analyses and remedies. *Educational Psychologist*, 31, 115-121.
- Reusser, K. (1994). Tutoring mathematical text problems: From cognitive task analysis to didactic tools. In S. Vosniadou, E. De Corte & H. Mandl (Eds.), *Technology-based learning environments* (pp. 175-182). Berlin: Springer.
- Riesbeck, C. K. & Schank, R. C. (1989). *Inside case-based reasoning*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Rogers, R. D. & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 207-231.
- Rosenbloom, P. S., Laird, J. E. & Newell, A. (1993). *The SOAR papers: Research on integrated intelligence* (Vol. 1). Cambridge, MA: MIT Press.
- Ross, B. H. (1984). Reminders and their effects in learning a cognitive skill. *Cognitive Psychology*, 16, 371-416.
- Ross, B. H. (1987). This is like that: The use of earlier problems and the separation of similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 629-639.

- Ross, B. H. (1989a). Distinguishing types of superficial similarities: Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 456-468.
- Ross, B. H. (1989b). Reminders in learning and instruction. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 438-469). Cambridge, CA: Cambridge University Press.
- Ross, B. H. & Bradshaw, G. L. (1994). Encoding effects in reminders. *Memory & Cognition*, 22, 591-605.
- Ross, B. H. & Kennedy, P. T. (1990). Generalizing from the use of earlier examples in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 42-55.
- Ross, B. H. & Kilbane, M. C. (1997). Effects of principal explanation and superficial similarity on analogical mapping in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 427-440.
- Rouet, J.-F., Levonen, J. J., Dillon, A. & Spiro, R. J. (1996). *Hypertext and cognition*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E. & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 763-797.
- Sacerdoti, E. D. (1977). *A structure for plans and behaviour*. Amsterdam: Elsevier.
- Salomon, G. & Perkins, D. N. (1989). Rocky roads to transfer: Rethinking mechanisms of a neglected phenomenon. *Educational Psychologist*, 24, 113-142.
- Salvucci, D. D. & Anderson, J. R. (1998). Analogy. In J. R. Anderson & C. Lebiere (Eds.), *The atomic components of thought* (pp. 343-383). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Schmid, U., Wirth, J. & Polkehn, K. (2003). A closer look at structural similarity in analogical transfer. *Cognitive Science Quarterly*, 3, 57-89.
- Schmidt, R. A. & Bjork, R. A. (1992). New conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*, 3, 207-217.
- Schoenfeld, A. H. (1979). Explicit heuristic training as a variable in problem-solving performance. *Journal for Research in Mathematics Education*, 10, 173-187.
- Schoenfeld, A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. San Diego: Academic Press.
- Schoenfeld, A. H. & Herrmann, D. J. (1982). Problem perception and knowledge structure in expert and novice mathematical problem solvers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8, 484-494.
- Schunn, C. D., Lovett, M. C. & Reder, L. M. (2001). Awareness and working memory in strategy adaptivity. *Memory & Cognition*, 29, 254-266.
- Schunn, C. D. & Reder, L. M. (2001). Another source of individual differences: Strategy adaptivity to changing rates of success. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 59-76.
- Shavlik, J. W., DeJong, G. F. & Ross, B. H. (1987). Acquiring special case schemata in explanation-based learning. In *Proceedings of the 9th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 851-860) Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Siegler, R. S. & Shipley, C. (1995). Variation, selection, and cognitive change. In T. J. Simon & G. S. Halford (Eds.), *Developing cognitive competence: New approaches to process modeling*. (pp. 31-76). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Silbert, J., Carnine, D. & Stein, M. (1981). *Direct instruction mathematics*. Columbus: Charles E. Merrill Publishing Company.
- Silver, E. A. (1981). Recall of mathematical problem information: Solving related problems. *Journal for Research in Mathematics Education*, 12, 54-64.
- Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7, 268-288.
- Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual Review of Psychology*, 41, 1-19.
- Simon, H. A. & Chase, W. G. (1973). Skill in chess. *American Scientist*, 61, 394-403.
- Simon, H. A. & Reed, S. K. (1976). Modeling strategy shifts in a problem-solving task. *Cognitive Psychology*, 8, 86-97.
- Singley, M. K. & Anderson, J. R. (1989). *The transfer of cognitive skill*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Sohn, M.-H. & Anderson, J. R. (2001). Task preparation and task repetition: Two-component model of task switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 764-778.
- Spector, A. & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *American Journal of Psychology*, 89, 669-679.
- Spellman, B. A., & Holyoak, K. J. (1992). If Saddam is Hitler then who is George Bush? Analogical mapping between systems of social roles. *Journal of Personality and Social Psychology*, 62, 913-933.
- Spellman, B. A., & Holyoak, K. J. (1996). Pragmatics in analogical mapping. *Cognitive Psychology*, 31, 307-366.
- Spies, K. & Hesse, F. W. (1987). Problemlösen. In G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine experimentelle Psychologie* (S. 371-430). Stuttgart: Fischer.
- Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Colson, R. L. & Anderson, D. K. (1989). Multiple analogies for complex concepts: Antidotes for analogy-induced misconception in advanced knowledge acquisition. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 498-531). New York: Cambridge University Press.
- Staub, F. C. & Reusser, K. (1995). The role of presentational structure in understanding and solving mathematical word problems. In C. A. Weaver, S. Mannes & C. R. Fletcher (Eds.), *Discourse comprehension: Essays in honor of Walter Kintsch* (pp. 285-305). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sternberg, R. J. & Ben-Zeev, T. (2001). *Complex cognition*. New York: Oxford University Press.
- Strube, G. & Janetzko, D. (1990). Episodisches Wissen und fallbasiertes Schließen: Aufgaben für die Wissensdiagnostik und die Wissenspsychologie. *Schweizerische Zeitschrift für Psychologie*, 49, 211-221.
- Suppes, P., Jerman, M. & Brian, D. (1968). *Computer-assisted Instruction: Stanford's 1965-66 arithmetic program*. New York: Academic Press.

- Suppes, P., Loftus, E. & Jerman, M. (1969). Problem-solving on a computer-based teletype. *Educational Studies in Mathematics*, 2, 1-15.
- Sweller, J. (1976). The effect of task complexity and sequence on rule learning and problem solving. *British Journal of Psychology*, 67, 553-558.
- Sweller, J. (1980a). Hypothesis salience, task difficulty, and sequential effects on problem solving. *American Journal of Psychology*, 93, 135-145.
- Sweller, J. (1980b). Transfer effects in a problem solving context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67, 116-123.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller, J. (1999). *Instructional Design*. Melbourne: ACER Press.
- Sweller, J. & Cooper, G. A. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition & Instruction*, 2, 59-89.
- Sweller, J. & Gee, W. (1978). Einstellung, the sequence effect, and hypothesis theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4, 513-526.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10, 251-296.
- Tack, W. H. (1987). Ziele und Methoden der Wissensrepräsentation. *Sprache & Kognition*, 3, 150-163.
- Thorndike, E. L. (1906).. *The principles of teaching, based on psychology*. Syracuse, NY: Mason.
- Thorndike, E. L. (1914). *Educational psychology: Briefer course*. New York: Teachers College, Columbia University.
- Thorndike, E. L. (1924). Mental discipline in high school studies. *Journal of Educational Psychology*, 15, 1-22.
- Thorndike, E. L. & Woodworth, R. S. (1901). The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions I. *Psychological Review*, 8, 247-261.
- Trafton, G. J. & Reiser, B. (1993). The contributions of studying examples and solving problems to skill acquisition. In M. Polson (Ed.), *Proceedings of the 15th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1017-1022). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Van Merriënboer, J. J. G. (1997). *Training complex cognitive skills: A four-component instructional design model for technical teaching*. Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications.
- Van Merriënboer, J. J. G., Clark, R. E. & de Croock, M. B. M. (2002). Blueprints for complex learning. *Educational Technology Research & Development*, 50, 39-64.
- VanLehn, K. (1989). Problem solving and cognitive skill acquisition. In M. Posner (Ed.), *Foundations of cognitive science* (pp. 527-579). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- VanLehn, K. (1996). Cognitive skill acquisition. *Annual Review of Psychology*, 47, 513-539.

- Veloso, M. M. (1994). *Planning and learning by analogical reasoning*. Berlin: Springer.
- Vosniadou, S. & Ortony, A. (1989). *Similarity and analogical reasoning*. New York: Cambridge University Press.
- Weaver, C. & Kintsch, W. (1992). Enhancing students' comprehension of the conceptual structure of algebra word problems. *Journal of Educational Psychology*, 84, 419-428.
- Weber, G. (1994). *Fallbasiertes Lernen und Analogien*. Weinheim: Beltz.
- Weisberg, R., DiCamillo, M., & Phillips, D. (1978). Transferring old associations to new situations: A nonautomatic process. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 17, 219-228.
- Wertheimer, M. (1945). *Productive thinking*. New York: Harper and Brothers Publishers.
- Wickelgren, W. A. (1974). *How to solve problems*. San Francisco: Freeman.
- Winston, P. H. (1975). *The psychology of computer vision*. New York: McGraw-Hill.
- Winston, P. H. (1980). Learning and reasoning by analogy. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 23, 689-703.
- Zhu, X. & Simon, H. A. (1987). Learning mathematics from examples, and by doing. *Cognition and Instruction*, 4, 137-166.
- Zollman, A. (1987, April). *Aspects of transfer of learning in mathematical problem solving with respect to the order of presentation*. Paper presented at the 68th Annual Meeting of the American Educational Research Association.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Stellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden; auch wurde mit dieser Arbeit oder mit einer anderen Dissertation noch kein anderer Promotionsversuch unternommen. Es handelt sich um eine bislang unveröffentlichte Arbeit.

Tübingen, den 2. Juni 2003