

Mack, W. (2002). Die Wahrnehmung kleiner Anzahlen und die Entwicklung des Zahlenverständnisses beim Kleinkind. Unveröffentl. Habilitationsschrift, FB Psychologie und Sportwissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt a. M.: Frankfurt a. M.

Die Wahrnehmung kleiner Anzahlen und
die Entwicklung des Zahlenverständnisses beim Kleinkind

Dr. Wolfgang Mack

Habilitationsschrift

Fachbereich Psychologie und Sportwissenschaften der
Johann Wolfgang Goethe - Universität
Frankfurt am Main

2002

Dankeswort

Diese Schrift und die hier berichteten Experimente wären ohne die Unterstützung und Mitwirkung anderer nicht realisierbar gewesen. Daher mein Dank an alle, die in der einen oder anderen Weise dazu beitrugen, indem sie mich inhaltlich, technisch, mitarbeitend, teilnehmend, fördernd, beratend und kritisch-konstruktiv sowie nicht zuletzt motivational und rückhaltgebend unterstützten.

Besonders erwähnen möchte ich meine Kolleginnen und Kollegen aus der Arbeitseinheit Entwicklungspsychologie des Instituts für Psychologie der Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main, Prof. Dr. Monika Knopf, Doris Jindra-Suess, Dr. Nadya Natour sowie PD Dr. Horst Krist und vom Innovationskolleg "Formale Modelle kognitiver Komplexität" an der Universität Potsdam Prof. Dr. Reinhold Kliegl, Hannelore Gensel und Thomas Liebscher. Meiner Frau, Dr. Gabriele Rössler, danke ich für ihre wertvolle Hilfe bei der Erstellung des Textes.

Elterngruppen, Familienberatungseinrichtungen und Kinderarztpraxen, deren Vertreterinnen und Vertreter bzw. deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sich für unsere Forschung interessieren, gaben uns Gelegenheit, für unser Anliegen zu werben und unterstützten uns damit in unverzichtbarer Weise. Ihnen sei ebenso gedankt wie natürlich und vor allem den zahlreichen Müttern und Vätern, die mit ihren Kleinsten ins Labor der Entwicklungspsychologie kamen und durch ihre Kooperationsbereitschaft diese Grundlagenforschung ermöglichten.

Inhalt

1	Einleitung: Numerische Kompetenzen	1
1. 1	Zählen als Kompetenz	1
	- Die Explananda der Psychologie: Kompetenzen	2
	- Exkurs: Kausalmechanistische und funktionale Ebenen psychologischer Erklärungen von Fähigkeiten und Fähigkeitsdomänen	3
	- Fähigkeit und Fähigkeitsdomäne	4
1.2	Aspekte numerischer Kompetenzen	5
1. 2. 1	Zählkompetenz als zentrale Teilstruktur der numerischen Kompetenz	5
1. 2. 2	Zählen und Quantifizieren	8
1. 2. 3	Wahrnehmung von Quantitäten	9
1. 3	Entwicklungspsychologischer Zusammenhang zwischen Anzahl-Perzeption und Zahlkonzept	13
1.4	Kurzer Überblick über die folgenden Kapitel	13
2	Theoretische Bestimmung der Domäne “Zahl”	16
2.1	Zahlaspekte	16
2. 1. 1	Der kardinale Zahlaspekt	18
2. 1. 2	Der Operatoraspekt der Zahlen	20
2. 1. 3	Der konstruktive Zahlaspekt	21
2. 1. 3. 1	Zählen, Auszählen und Abzählen	22
2. 1. 3. 2	Zahlen als Kennzeichnung eines Ranges	23
2. 1. 4	Der algebraische Zahlaspekt	23
2. 1. 4. 1	Rechenoperation und algebraischer Zahlaspekt	25
2. 1. 5	Der ordinale Zahlaspekt	26
2. 1. 5. 1	Ordnungsrelationen	26
2. 1. 5. 2	Zusammenhang des ordinalen mit anderen Zahlaspekten	27
2. 1. 6	Zusammenfassung	27
2. 2	Die Zählprinzipien nach Gallistel & Gelman	28
2. 3	Die psychische Realisierung der Zahlaspekte nach Fuson	32
3	Wahrnehmung kleiner Anzahlen: Subitizing	37
3. 1	Objektwahrnehmung als Voraussetzung des Subitizing	37
3. 1. 1	Segmentation und Bindung	40
3. 2	Subitizing	42
3. 2. 1	Ältere Erklärungsansätze	45
3. 2. 1. 1	Ortsfrequenz	45
3. 2. 1. 2	Kanonische Muster	45
3. 2. 1. 3	Arbeitsgedächtnis	46
3. 2. 2	Modelle des Subitizing	47
3. 2. 2. 1	FINST-Modell	47
3. 2. 2. 2	Object-file Modell	54

3. 2. 2. 3	Numeron - Modell	57
3. 2. 2. 4	Akkumulatormodell	57
	Exkurs: Enumeration im Tierversuch als Basis des präverbales Zählmodelles	59
3. 3	Subitizing und präverbales Zählen	60
3. 3. 1	Das Akkumulator-Modell als präverbales Zählmodell	60
3. 3. 2.	Akkumulatormodell und Subitizing	62
3. 4	Experimentelle Identifikation des Subitizing	63
3. 4. 1	Interindividuelle Unterschiede	63
3. 4. 2	Stimulus- und reaktions-limitierte Prozesse	65
3. 5	Experimente zum Subitizing	67
3. 5. 1	Experiment 1	67
	- Diskussion des Experimentes 1	73
3. 5. 2	Experiment 2	74
	- Diskussion des Experimentes 2	78
3. 5. 3	Experiment 3	79
	-Diskussion des Experiments 3	82
3. 5. 4	Diskussion der Experimente zum Subitizing	82
4	Nachweis numerischer Kompetenzen von Säuglingen	86
4.1	Numerische Kompetenzen bei Säuglingen	86
4.2	Methodologische und methodische Aspekte der Säuglingsforschung	87
4.2.1	Grundsätzliche methodologische Überlegungen zur Säuglingsforschung	87
4. 2. 2	Prämissen der kognitionspsychologischen Säuglingsforschung	92
4. 2. 2. 1	Orientierungsreaktion und Habituation	93
4. 2. 3	Skizze einiger basaler Methoden der Säuglingsforschung	96
4. 2. 3. 1	Die Methode der Präferenzen	97
4. 2. 3. 2	Die Methode der Habituation	98
4. 2. 3. 3	Lernmethoden	100
4. 2. 4	Interne und externe Validität von Säuglingsexperimenten	103
4. 3	Befunde zur numerischen Kompetenz von Säuglingen	106
4. 4	Experimente zur numerischen Kompetenz von Säuglingen	112
4 .4. 1	Diskrimination visueller Numerositäten	112
4. 4. 1. 1	Experiment 4	113
	- Diskussion des Experimentes 4	119
4. 4. 1. 2	Experiment 5	120
4. 4. 1. 3	Diskussion der Experimente 4 und 5	124
4. 4. 2	Diskrimination auditiver Numerositäten	128
4. 4. 2. 1	Experiment 6	128
	- Diskussion des Experimentes 6	134
4. 4. 2. 2	Experiment 7	134
4. 4. 2. 3	Experiment 8	136
4. 4. 2. 4	Experiment 9	138

4. 4. 2. 5	Diskussion der Experimente 6 bis 9	140
4. 4. 3	Diskussion der Säuglingsexperimente	141
5	Diskussion	145
5. 1	Zusammenfassung der Ergebnisse	145
5. 1. 1	Experimente zum Subitizing	145
5. 1. 2	Experimente zur Anzahldiskrimination bei Säuglingen	147
5. 2	Allgemeinpsychologische Diskussion	149
5. 2. 1	Mechanismen des Subitizing	149
	- Die Indexing-Hypothese (Leslie et al., 1998)	150
	- Indexing und die auditive Modalität	153
	- Indexing und amodale Zählermodelle	154
5. 2. 2	Subitizing und Zählen	156
5. 3	Entwicklungspsychologische Diskussion	158
5. 3. 1	“Numerisches Wissen” bei Säuglingen: Numerische oder prä-numerische Kompetenz?	159
	- Numerische Kompetenz	159
	- Prä-numerische Kompetenz	161
5. 3. 2	Aspekte der Zählentwicklung	163
5. 3. 2. 1	Die Entwicklung des Zahlbegriffs nach Piaget	164
	- Anzahl als Invarianz	165
	- Kritik	166
5. 3. 2. 2	Numerischer Mengenvergleich:	
	- Das Erkennen von Äquivalenzrelationen	166
	- Anzahl als Klassifikationskriterium	166
	- Verbale Zählfertigkeit	169
	- Entwicklung numerischer Kompetenzen	171
5. 4.	Die Entwicklung des Zählens im Rahmen des Repräsentationalen Redeskription-Modells (RR-Modell) von Karmiloff-Smith	172
	-Das RR-Modell	173
	- Repräsentationale Veränderung der Zählfertigkeit	175
5.5	Entwicklung der Zählfertigkeit: Zur Rolle von Subitizing und sprachlich- symbolischen Fähigkeiten	176
5.6	Resümee	180
	- Zählen und Subitizing	180
	- Numerische Kompetenz von Säuglingen	181
	- Entwicklung der Zählkompetenz	182
Literatur		184
Anhang	Abbildungen	201-223

1 Einleitung: Numerische Kompetenzen

1. 1 Zählen als Kompetenz

Zahlen durch Zahlwörter und Ziffern durch sprachliche Mittel auszudrücken ist inzwischen in allen natürlichen Sprachen üblich. Der mündliche und schriftliche Umgang mit Zahlwörtern, das Zählen und das Rechnen werden als elementare Kulturtechniken angesehen, die in allen Kulturen neben dem Lesen und Schreiben als basale zu lernende Fertigkeit in Bildungseinrichtungen vermittelt werden. Kulturgeschichtlich ist das Konzept der Zahl ohne Zweifel von hoher Bedeutung für das menschliche Denken. Neben der Sprache als Denkwerkzeug (vgl. Organonmodell der Sprache von Bühler, 1934) sind die Zahlen ein Denkmittel, das unsere Auffassung und Interpretation der Wirklichkeit grundlegend beeinflusst hat. Die Naturwissenschaften sind ohne die Verwendung und Anwendung von Zahlen kaum vorstellbar und die Darstellung von Gesetzmäßigkeiten und Regelmäßigkeiten durch ideale mathematische Gebilde gilt als erstrebenswertes Erkenntnisziel. Zählen, Messen und Berechnen sind diejenigen Anwendungsweisen von Zahlen, die es erlauben, Ordnung in der Natur darzustellen und Naturvorgänge vorherzusagen. Die maschinelle Realisierung des Rechnens durch bistabile elektrische Zustände in Schaltkreisen der Computer hat zu tiefgreifenden kulturellen Veränderungen geführt. Zahlen sind jedoch nicht nur als Mittel, sondern auch als Gegenstand der Erkenntnis zu sehen. Die Zahl als Erkenntnisgegenstand hat die Mathematik ganz wesentlich bestimmt sowie die Philosophie zu Fragen angeregt, z.B. nach der Existenzweise von Zahlen: Handelt es sich um Abstraktionen aus erfahrenen Gegenständen, dem Umgang mit diskreten Quanta oder kommt den Zahlen eine vom menschlichen Erkennen unabhängige ideale Existenzweise zu?

Die Besonderheit der Zahlen als Erkenntnismittel und -gegenstand hängt damit zusammen, dass sie sich universell anwenden lassen: zählen lassen sich die unterschiedlichsten ontologischen Entitäten, seien es Dinge, Ereignisse, beliebige Zusammenfassungen von solchen, Zeitabschnitte, Vorstellungen, selbst Zahlen lassen sich Zählen, wie z.B. die ungeraden Zahlen oder die Primzahlen. Alles, was sich überhaupt bestimmen lässt, scheint zählbar, messbar, berechenbar zu sein (Schäfer, 1973). Frege (1894) kennzeichnet das Gebiet des Zählbaren als "das umfassendste; denn nicht nur das Wirkliche, nicht nur das Anschauliche gehört ihm an, sondern alles Denkbare"(S. 21). Er folgert: "Sollten also nicht die Gesetze der Zahlen mit denen des Denkens in der innigsten Verbindung stehen?" Zahlen sind bedeutsame Gegenstände der menschliche Kognition, weswegen sich zahlreiche Studien mit den psychologischen Aspekten des Verstehens und Verwendens von Zahlen beschäftigt haben, aber auch mit der Frage, ob und wenn ja, inwieweit Tiere zählen. In den meisten dieser Studien wird die Zahl als Erkenntnismittel verstanden, das Menschen anwenden, um bestimmte Aufgaben oder Probleme zu lösen. Die vielfachen Möglichkeiten, Zahlen zu verstehen und anzuwenden, setzen auf der Seite der Anwender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Wissen voraus, welche allgemein als numerische Kompetenzen bezeichnet werden. Im folgenden werden numerischen Kompetenzen näher gekennzeichnet.

Die Explananda der Psychologie: Kompetenzen

Der Ausdruck "Kompetenz" ist synonym zu "Fähigkeit" zu verstehen, wobei unter Fähigkeit eine Struktur personinterner Dispositionen verstanden wird, welche die Voraussetzung dafür sind, in bestimmten Anforderungssituationen (z.B. Tests, Prüfungen, Experimente) bestimmte Leistungen zu erbringen. Generell gilt, dass das Verhalten und Bestandteile der Situation beobachtet werden können, wohingegen personinterne Faktoren oder Eigenschaften nicht beobachtet werden können. Diese personinternen Eigenschaften sind als Dispositionen aufzufassen. Im Rahmen einer Theorie lassen sich aus den beobachtbaren Größen Verhalten und Situation Indikatoren ableiten (Observablen) und Testbedingungen so festlegen, dass das Auftreten oder Nichtauftreten oder das Vorliegen bestimmter Abstufungen des Indikators (im Idealfall metrischer Art) den Schluss auf diese Dispositionen als hypothetische Konstrukte oder eine bestimmte (metrische) Ausprägung derselben erlauben.

Fähigkeiten sind Dispositionen zu Verhalten, welche nicht beobachtbar sind und den Status eines theoretischen Begriffes haben. Sie sind durch analytische Äquivalenzdefinitionen, in denen der Ausdruck für das Definiendum durch den Ausdruck des Definiens ersetzt werden kann, nicht vollständig zu kennzeichnen. Eine vollständige Kennzeichnung eines Begriffes liegt vor, wenn der Begriff als eine Menge (Extension) von Merkmalen aufgefasst wird und von jedem vorliegenden Merkmal eindeutig entschieden werden kann, ob es zu dieser Menge gehört oder nicht. Kann diese Entscheidung nicht getroffen werden, ist der Begriff vage. Die Bedeutung des Begriffes wird vielmehr implizit durch die wechselseitigen Beziehungen des Begriffs zu anderen Begriffen der Theorie über einen bestimmten Gegenstandsbereich definiert. Nicht nur in der Psychologie, sondern in allen Naturwissenschaften kommen zahlreiche Eigenschaftsbegriffe und damit Dispositionsprädikate vor. "Wollen", "Wünschen", "Wissen", "Können" "Fähigkeit" oder "Intelligenz" sind Beispiele aus der Psychologie, in der Physik und der Chemie sind alle Materialkonstanten Dispositionen wie z.B. "elektrische Leitfähigkeit", "wasserlöslich", "Elastizitätsmodul" oder "magnetisch", aber auch Begriffe wie "Gravitation" oder "Kraft". Streng auseinander zuhalten sind in diesem Zusammenhang Erklärungen durch Angabe von Dispositionen und Erklärungen durch Angabe von Ursachen.

Der Grad der Vagheit oder Mehrdeutigkeit hängt allerdings davon ab, wie gut der Begriff in einer Theorie verankert ist, d.h., wie gut er sich empirisch bewährt hat oder wie nützlich er sich für Erklärungen erweist. Fähigkeiten sind nach Cummins (2000) dispositionale Eigenschaftskomplexe, welche die typischen Explananda der Psychologie darstellen. Psychologische Erklärungen sind daher nicht im Subsumieren unter Regeln und Gesetze zu sehen und fallen auch nicht unter das Hempel-Opppenheimer - Schema deduktiv-nomologischer Erklärungen, sondern zielen auf die Analyse und Aufdeckung der Strukturen, die mit den Dispositionsprädikaten bezeichnet werden. Die Vorgehensweise ist die funktionale und komponentiale Analyse. Die funktionale Analyse strebt die Beschreibung einer Disposition durch einfachere Dispositionen an. Mit "Analyse" wird die Zerlegung einer Fähigkeit in Teilfähigkeiten oder elementare Fähigkeiten bezeichnet, mit "funktional" wird darauf abgehoben, die Dynamik des Zusammenwirkens der Teilfähigkeiten oder elementaren Fähigkeiten in der Performanzgenese darzustellen. Die Fähigkeiten werden also ausschließlich unter dem Aspekt ihrer kausalen Rolle im psychischen Wirkungsgefüge betrachtet, wobei von der materiellen Realisierung dieser Fähigkeiten abgesehen wird. Das Resultat ist ein Programm, dessen Ablauf die

Performanzgenese modelliert, wobei von der konkreten physikalischen Realisierungsbedingung abgesehen wird. Damit wird die Nähe zum philosophischen Funktionalismus verdeutlicht, der im computationalistischen Erklärungsansatz die adäquate Interpretation psychischer Abläufe sieht. Die Komponentenanalyse kann deckungsgleich mit der funktionalen Analyse sein, da sie einfach die Zerlegung einer Fähigkeit in ihre Komponenten anstrebt (Cummins, 2000). Allerdings sollten beide Ausdrücke konzeptuell getrennt werden, da die Komponenten wiederum aus Dispositionen bestehen könnten, die in der Analyse der Gesamtfähigkeit keine Rolle spielen (z.B. kann die Analyse von Wahrnehmungen von Schachstellungen bei Experten und Novizen darauf verzichten, die Dispositionen der 3D-Wahrnehmung des visuellen Systems zu analysieren).

Exkurs: Kausalmechanistische und funktionale Ebenen psychologischer Erklärungen von Fähigkeiten und Fähigkeitsdomänen

Theoretische Begriffe wie Dispositionen sollten möglichst viele systematisch kovariierende Observablen erklären, wobei die Erklärung durch eine Disposition mit zahlreichen Kausalmechanismen verträglich sein kann. Im Falle von theoretischen Begriffen aus der Psychologie wären solche Kausalmechanismen neurophysiologischer Art. Die Erklärung des Verhaltens durch Dispositionen geschieht auf der funktionalen Ebene. Selbst ein angeblich elementarer Begriff wie der der “Reaktion” ist ein funktional erklärender Begriff, da eine Reaktion wie “eine Taste drücken” durch unterschiedliche Bewegungen realisiert werden kann. Eine “Reaktion” ist demzufolge die Kennzeichnung einer Äquivalenzklasse von Bewegungen. Jede einzelne Bewegung ist wiederum durch einen Kausalmechanismus bestimmt, durch zentralnervöse und peripherphysiologische Ereignisfolgen. Kennt man nur einen neurophysiologischen Kausalmechanismus PHI, so kann man von PHI nicht eindeutig auf den dazugehörigen funktionalen Zustand PSY schließen und noch weniger darauf, in welchen funktionalen Zusammenhang dieser Zustand eingebettet ist und welche funktionale Rolle er darin spielt.

Jede systematische psychologische Erklärung der Verhaltens oder Erlebens hat zunächst zwei Größen zu berücksichtigen:

- i) S, die aktuelle Situation oder Reizkonstellation¹
- ii) D, die aktuellen (states) und habituellen (traits) Dispositionen

Nach Fodor (1985) sind Erklärungen durch Dispositionen Theorien der Phase 1 und Erklärungen durch Kausalmechanismen Theorien der Phase 2. Kausalmechanismen neurophysiologischer Art sind Modelle bestimmter Dispositionen, z.B. der Disposition “Reaktionszeit”, “ikonisches Gedächtnis”, “Motiv” usw. Nach Fodor (1985, S. 426f.) charakterisieren psychologische Theorien der Phase 1 *“die inneren Zustände von Organismen nur in Hinsicht auf die Art und Weise, wie sie in der Erzeugung von Verhalten funktionieren. Letztlich stellt man sich den Organismus als einen Apparat zur Erzeugung bestimmten Verhaltens bei bestimmten sensorischen Stimulierungen vor. Eine psychologische Erklärung der Phase Eins versucht, die inneren Zustände zu bestimmen, die ein solcher Apparat durchlaufen muss, wenn der das*

¹¹ Zum nicht unproblematischen Begriff des “Reizes” vgl. Gundlach (1976)

Verhalten, das der Organismus hervorbringt, zu den Gelegenheiten hervorbringen soll, zu denen er es hervorbringt. Daraus, dass in diesem Stadium die Eigenschaften dieser Zustände durch Berufung auf die Annahmen bestimmt werden, sie hätten alle für die Erklärung des Verhaltens-Repertoires des Organismus nötigen Merkmale, folgt, dass eine Theorie der Phase I uns über solche Zustände nur sagt, welche Rolle sie bei der Erzeugung von Verhalten spielen. Es folgt auch, dass der Nachweis der für das Vorhandensein solcher Zustände zu erbringen ist, einfach darin besteht, dass ihr Vorhandensein anzunehmen die einfachste Art und Weise ist, die bekannten Verhaltenskapazitäten des Organismus zu erklären". Funktionale Erklärungen vermitteln Dispositionen weisen gewissermaßen der Erklärung durch Kausalmechanismen den Weg; psychologische Erklärungen wären unvollständig, wenn sie nur erklärten, "worin die neurale Verschaltung besteht; sie muss auch erklären, was eine solche Verschaltung leistet" (Fodor, 1985, S. 432). Die Konstrukte der Psychologie ermöglichen das, indem sie festlegen, welche psychischen Strukturen welches Verhalten wann in welcher Situation in welcher Weise ermöglichen. Der Komplexitätsgrad funktionaler Erklärungen kann sehr unterschiedlich sein. Dies betrifft zum einen die Test-Indikator-Paare einer Disposition, aber auch den theoretischen Zusammenhang einzelner Dispositionen. Bestimmte Dispositionen können wiederum definitorische Bestandteile einer anderen Disposition sein wie das bei den Dispositionsprädikaten "Intelligenz", aber auch "numerische Kompetenz" der Fall ist.

Fähigkeit und Fähigkeitsdomäne

Die Kompetenz einer Person muss inhaltlich charakterisiert werden, damit geklärt werden kann, welche Art von Performanz als Indikator für die Kompetenz in Frage kommt. Jeder Kompetenz muss daher ein Gegenstandsbereich, eine Domäne zugeordnet werden. Verben wie können und wissen, die zur Charakterisierung von Fähigkeiten dienen, sind transitiv, sie verlangen nach Objekten, nach dem, was man kann und was man weiß. Dieser Objektbereich von Fähigkeiten ist allerdings nicht durch eine psychologische Theorie erklärbar, sondern hat seine jeweils eigene Theorie oder sein eigenes Regelwerk, z.B. Theorien der Physik, der Sprache oder bestimmte Spielregeln. Da im Rahmen der Psychologie eine Fähigkeit erklärt werden soll, was zu einer psychologischen Theorie über diese Fähigkeit führen soll, und da sich aber Fähigkeiten nur über den nichtpsychologischen Inhalt und Gegenstandsbereich derselben identifizieren lassen, ist keine psychologische Fähigkeitsanalyse möglich, ohne den Gegenstandsbereich zu analysieren. Schließlich legt der Gegenstandsbereich die Normen fest, deren Befolgung erst die Ausübung einer bestimmten Fähigkeit ermöglicht. Um Schachspielen zu können, muss man die Schachregeln kennen und können. Die (fachspezifische) Gegenstandstheorie wird also von einer psychologischen Theorie vorausgesetzt. Diese Form des Subjekt-Objekt-Problems der Erkenntnistheorie ist geradezu konstitutiv für die Psychologie (vgl. Bromme, 1985, S. 265). Eine Domäne ist also ein Gegenstandsbereich, dessen Gegenstände sowie die Relationen, in denen diese stehen, durch Regeln charakterisiert werden, die Prinzipien und zulässige Transformationen der Gegenstände festlegen.

1.2 Aspekte numerischer Kompetenzen

Eine vollständige Definition numerischer Kompetenzen kann nicht erwartet werden. Numerische Kompetenzen sind eingebettet in die umfassendere Struktur intellektueller Kompetenzen, die aber im folgenden weitgehend ausgeblendet wird. Um ihre Struktur zu analysieren, müssen sie aber hinsichtlich ihres Zusammenhanges mit quantitativen sowie sprachlichen Kompetenzen diskutiert werden. Außerdem muss der Gegenstandsbereich der numerischen Kompetenzen, Zahlen, Anzahl und diskrete Quanta, erörtert werden, um die numerische Kompetenzen zu kennzeichnen.

Am besten kann man sich der Beantwortung der Frage nach der Struktur numerischer Kompetenzen über eine vorläufige Arbeitsdefinition nähern, die angelehnt an Dehaene (1992) so formuliert werden kann:

- (1) Numerische Kompetenzen sind diejenigen psychischen Strukturen und Prozesse, die dem Verstehen, dem Produzieren von und dem Operieren mit Zahlen (mentalen Rechnen) zugrunde liegen.

Numerische Kompetenzen sind als eine wesentliche Substruktur mathematischer Kompetenzen aufzufassen, die im Wissen über mathematische Konzepte (z.B. "Menge", "Funktion", "Vektor", "geometrische Reihe", "geometrischer Ort" usw.) und im Können der Anwendung mathematischer Regeln (z.B. "Konstruieren", "Faktorisieren", "trigonometrische Dreiecksberechnung", "Lösung einer linearen Gleichung", "Beweisverfahren" usw.) bestehen. Das Operieren mit Zahlen, das Rechnen, bildet eine weitere Substruktur der numerischen Kompetenz, mit welcher sich u.a. die kognitive Arithmetik beschäftigt (z.B. Ashcraft, 1992; Campbell, 1994). Allerdings werden immer wieder elementare Operationen wie die Addition und Subtraktion zur Erörterung des Zahlenverständnisses herangezogen, da die Zahlen einen operativen und algebraischen Aspekt haben (vgl. Kap. 2). Jedoch wird darauf hingewiesen, dass die Kompetenz zum Rechnen nicht ein notwendiger Bestandteil des Zahlkonzeptes ist (Davis & Pérusse, 1988).

1. 2. 1 Zählkompetenz als zentrale Teilstruktur der numerischen Kompetenz

Im Mittelpunkt der Erörterung der numerischen Kompetenzen soll die Zählkompetenz stehen, das Verstehen und Anwenden von Zahlen. Die Frage nach der mentalen Struktur und den mentalen Prozessen, die die Zählkompetenz ausmachen, lässt sich auch als Frage nach den mentalen Repräsentationen verstehen, die dem Konzept der Zahl zugrunde liegen. Allerdings lässt sich diese Frage nur dann beantworten, wenn geklärt ist, aus welchen Teilkompetenzen die Zählkompetenz besteht. Die Analyse der Zählkompetenz wird nicht unerheblich dadurch erschwert, dass in der einschlägigen Forschungsliteratur zu numerischen Kompetenzen bei Tieren, Säuglingen, Kindern und erwachsenen Menschen, ein terminologisches Chaos herrscht, worauf Davis & Pérusse (1988) in einer Übersichtsarbeit hinwiesen, die jedoch auf die numerischen Kompetenzen bei Tieren fokussierte. Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist die hervorgehobene Einsicht, dass es verfehlt wäre, die Zählkompetenz ausschließlich als Teil der symbolisch-sprachlichen Kompetenz anzusehen. Schon früh wurde von Entwicklungspsychologen (z.B. Bühler, 1930; Koffka, 1925; Descoedres, 1914; Piaget &

Szeminska, 1941; Gast, 1954; 1957) die Frage gestellt, ob sich nicht bei kleinen Kindern vorsprachliche Vorläuferkompetenzen des Mengen- und Anzahlerfassens beobachten lassen, die konstitutiv für die Zählkompetenz sind. In die gleiche Richtung zielten Untersuchungen unterschiedlicher Kulturen und Ethnien, die nicht über das dezimale Zahlensystem verfügten und bei denen Zahl und Gegenstand noch eng verbunden waren (z.B. Wertheimer, 1912; Werner, 1953; Menninger, 1979; weitere Literaturangaben bei Ifrah, 1991 und Krämer, 1988). Der normale erwachsene, kompetent Zählende verfügt über Kenntnisse von Zahlzeichen, die aus Zahlwörtern, Ziffern oder Zahlgebilden bestehen, sowie über Regeln, diese Zahlzeichen anzuwenden und zu kombinieren (vgl. Kap. 2). Beim Zählen werden üblicherweise Worte (Numeralia) den zu zählenden Dingen zugeordnet, wobei eine grundlegende Voraussetzung der zu zählenden Dinge darin besteht, dass sie von einander unterscheidbar sind. Die Numeralia bilden eine feste Sequenz, sie bilden genauso wie die zu zählenden Dinge eine Menge, die Zählreihe. Numeralia können mündlich oder schriftlich geäußert werden, wobei im Falle der schriftlichen Produktion Numeralia meist durch Zahlziffern ersetzt werden, da nur mit diesen im Stellensystem der Zahlen schriftlich gerechnet werden kann und da sie sich als Abkürzung der längeren Numeralgrapheme eignen. Das Codieren dieser unterschiedlichen Zahlenformate (mündlich in schriftlich, Aussprechen des Numeralwortes beim Lesen einer Ziffer usw.) ist Bestandteil der sprachlichen Kompetenz.

Neuropsychologische Studien mit Patienten, die an Akalkulie, Dyskalkulie oder aphasischen Syndromen litten, zeigten, dass unterschiedliche Prozesse des Codierens gestört sein können und dass das Verständnis und das Produzieren von Zahlen sehr eng an sprachliche Leistungen gebunden ist (Dehaene & Cohen, 1994). Allerdings scheint es ein Repräsentationssystem für Zahlen zu geben, das weitgehend unabhängig vom sprachlichen System ist, was Studien zur Dissoziation entsprechender sprachlicher und numerischer Leistungen bei neurologischen Patienten zeigen (Dehaene & Cohen, 1994).

Die neuropsychologischen Befunde sind jedoch nicht das wichtigste Argument gegen die vollständige Subsumption der Zählkompetenz unter die sprachliche Kompetenz. Es wurde oben schon darauf hingewiesen, dass das Zählen etwas voraussetzt, das gezählt werden kann. Voraussetzung der Zählbarkeit sind voneinander unterscheidbare Elemente, wobei "Element" bedeutet, dass irgendetwas als eine Einheit aufgefasst wird. Das Etwas ist zunächst völlig unbestimmt, denn es kann sich um ein beliebiges Objekt der Wahrnehmung, des Vorstellens oder des Denkens handeln. Das einzige, was an diesem Etwas bestimmt ist, ist seine Einheit. Es lässt sich durch eine Zeigehandlung (Deixis) abgrenzen: Dies da ist ein Etwas, dies dort ein anderes Etwas. Egal unter welchem Winkel, unter welcher Perspektive dieses noch unbestimmte Etwas gesehen wird, seine numerische Identität bleibt erhalten. Es zeigt sich in diesem Zusammenhang, dass die Objektpermanenz auch in der numerischen Identität besteht: Ein Objekt bleibt dasselbe, auch wenn es unter verschiedenen Bedingungen wahrgenommen wird, seien es verschiedene Perspektiven, sei es, dass das Objekt kurzzeitig nicht mehr wahrnehmbar ist. In diesem Zusammenhang wird ersichtlich, dass die numerische Identität in der aktuellen Wahrnehmung selten aufrechterhalten werden kann, da man kaum ein Objekt ununterbrochen wahrnimmt. Wird ein Objekt kurzzeitig verdeckt oder wendet man sich zwischenzeitig einmal vom Objekt ab, so dass es nicht mehr im Wahrnehmungsfeld ist und nimmt man es wieder nach dieser Unterbrechung wahr, so kann man nicht mehr mit absoluter Sicherheit urteilen, ob es sich noch um das selbe Objekt handelt. Gibt es keine andere Evidenz, werden wir das Objekt dennoch als

dasselbe seiend interpretieren. Allerdings ist es dann angemessener, von einer qualitativen Identität zu sprechen. Es gibt zahlreiche Belege aus der Säuglingsforschung, die zeigen, dass schon ab 4 Monaten eine derartige qualitative Identität als Objektpermanenz wahrgenommen wird. Die qualitative Identität ist als protokzeptuell zu bewerten, da verschiedene Objekte gleichen oder ähnlichen Aussehens nicht von einander unterschieden und folglich zu einer Klasse zusammengefasst werden.

Dennoch bezeichnen numerische Identität und Einheit nicht dasselbe: Unter einer bestimmten Wahrnehmungseinstellung kann ein Hase als Einheit aufgefasst werden, unter einer anderen Wahrnehmungseinstellung kann man am Hasen andere Einheiten abzählen, z.B. die Anzahl der Beine, der Ohren usw. Daher ist es keineswegs a priori klar, was die Elemente eines Objektes oder einer Kollektion sind, die gezählt werden können, da sowohl einheitsstiftende Momente und als auch vereinzelnende Momente möglich sind. Element und Ununterscheidbarkeit definieren sich gegenseitig: Jedes Element ist eine Einheit, wenn es nichts mehr gibt, das an ihm unterschieden werden kann oder unterschieden werden soll und wenn es sich nicht von Moment zu Moment verändert. Allerdings darf nicht aus dem Auge verloren werden, dass wir selten Elemente direkt wahrnehmen: Sehen wir ein unförmiges Konglomerates von Murmeln, dann sehen wir auch die Murmeln als Elemente dieses Konglomerats. Meistens sind die Elemente das Resultat einer analytischen Einstellung. Eine phänomenale Gruppe oder Menge, eine Gestalt wird in einzelne Elemente zerlegt, beispielsweise das Sternbild des "Großen Wagens". Oder wenn man einen Baum wahrnimmt, dann ist es nicht leicht, diesen als Ansammlung von Blättern, Ästchen, Ästen und Stamm wahrzunehmen. Der Begriff "Einheit" ist vielmehr als Oberbegriff zu Begriffen wie "Gestalt", "Menge", "Element" usw. zu sehen. Es ist kaum verwunderlich, dass Platon im Einssein (hen) die Grundbestimmung von jeglichem Seienden gesehen hat. Insofern ist die Einheit konzeptueller, also "zusammenfassender" Natur, wobei bestimmte, in gewissen Grenzen willkürliche Kriterien festlegen, was zu welcher Einheit zusammengefasst werden soll. Häufig ist das wissenschaftliche Bestreben darauf gerichtet, die natürlichen Einheiten der Natur mit Hilfe von Experiment und Messung zu identifizieren. Numerische Identität und Einheit müssen allerdings auseinander gehalten werden, da unterschiedliche Einheiten unterschiedliche Kompositionsregeln haben. Die Gestalttheoretiker haben diesen Sachverhalt durch die Unterscheidung von summativen und übersummativen Bildungsgesetzen Ausdruck verliehen (Köhler, 1924; Rausch, 1937). Anders formuliert: Nicht alles, was sich zählen lässt, ist auch eine Einheit, aber alles, was Einheiten sind, sind auch zählbar. Voraussetzung der Zählbarkeit ist also nur, das sich das zu zählende Etwas von anderen Elementen abgrenzen und unterscheiden lässt. Allerdings gibt es Befunde in der Entwicklungspsychologie, die darauf hinweisen, dass Kinder nicht alles zählen, sondern bestimmte Objekte eher zählen als andere, z.B. zwei Gabeln im Vergleich zu zwei Gabelhälften (Gast, 1957; Shipley & Shepperson, 1990). Die numerische Eins ist also sowohl von der elementaren Einheit als auch von der Einheit als anordnungsirrelevanten Vielheit und der anordnungsrelevanten Ganzheit zu unterscheiden.

Das Vorliegen nur eines Elementes reicht aber nicht aus, um vom Zählen zu sprechen. Die Unterscheidung eines Elementes von einem anderen konstituiert eine Art von Zweiheit und setzt mindestens zwei Elemente voraus. In der Wahrnehmung können mehrere oder viele Elemente gegeben sein, die als ungeordnete Agglomeration nur durch das Zählen zusammengefasst werden können. Diese Zusammenfassung durch Zählen enthält ein analytisches und ein synthetisches Moment: Das analytische Moment besteht in der Vereinzelung jeweils eines einzigen Elementes, das

man beispielsweise mit dem Finger antippen kann oder das man in die Hand nimmt und auf einen anderen Platz legt. Auf diese Weise wird gleichzeitig Element für Element die Menge partitioniert in eine solche, die schon gezählt wurde und eine solche, die noch zu zählen ist. Das synthetische Moment besteht darin, dass diese gezählte Untermenge solange elementenweise vergrößert wird, bis sie identisch ist mit der gesamten Menge. Die zuletzt vergebene Zahl gibt die Anzahl der Menge wieder, ihre Mächtigkeit. Dieser empirische Zählvorgang verdeutlicht, dass das Zählen eine wahrnehmungsmäßige, aktionale Grundlage hat.

1. 2. 2 Zählen und Quantifizieren

Die Anzahl ist eine Eigenschaft der wahrgenommenen Welt, welche phänomenal gegeben ist, auch wenn sie in den meisten Fällen nicht zahlenmäßig bestimmt ist, was Abzählen oder Schätzen erforderlich machen würde. Ausdrücke wie Menge, Gruppe, Haufen, Ansammlung, Konglomerat, Paar oder Dreieck, weisen darauf hin, dass wir Quantitäten anzahlmäßig wahrnehmen. Insofern ist die Zählkompetenz in der quantitativen Natur unserer Umgebung und in unseren psychischen Funktionen wie der Raum-, Zeit-, Objekt- und Ereigniswahrnehmung verwurzelt. Eng damit zusammen hängt die Kompetenz zu quantifizieren. Unter Quantität soll die Eigenschaften eines Objektes oder einer phänomenalen Qualität verstanden werden, "die eines Mehr oder Weniger, einer Zu- oder Abnahme fähig sind" (Schäfer, 1973). Die Quantität ist also wesentlich komparativer Natur, da sie Unterscheidung und Vergleich von Objekten bezüglich ihrer Größe voraussetzt. Größen sind über eine Ordnungsrelation miteinander verknüpft, was sich als dimensionales Bezugssystem kennzeichnen lässt. In der Erfahrung bauen sich Bezugssysteme auf, in denen unser Wahrnehmen und Beurteilen von Größen unterschiedlicher Objekte geordnet sind. Diese Ordnung drückt sich in absoluten Urteilen aus wie z.B. "Diese Frau ist sehr groß", wobei dieses Urteil aufgrund des mnestisch stabilisierten Bezugssystems (Witte, 1966) der Erfahrungen mit Größen von Frauen gefällt werden kann. Aus der Größenunterscheidung heraus werden solche Vergleiche zum Teil hoch automatisch möglich. Diese mindestens ordinalen mentalen Maßstäbe erlauben die Feststellung von "gleich groß", "größer", "kleiner". Hierzu kann die numerische Bestimmung von Größen dienen, in welchem Falle die Zahlen Maß-Zahlen sind. Die enge Verbindung von Qualität und Quantität ist in den elementaren Qualitäten, den Grundgrößen der Mechanik, festzustellen: Masse, Länge und Zeit, aus denen weitere Größen abgeleitet werden können, z.B. Kraft oder Geschwindigkeit. Schäfer (1973) weist darauf hin, dass zum vollen Begriff der Quantität die Kategorie des Maßes gehört, wodurch "der Gegensatz von Qualität und Quantität aufgehoben (vermittelt)" sei, "sofern es immer Quantum von etwas besagt und im Begriff der Maßeinheit immer auch ein qualitatives Moment gesetzt ist" (S.1147). Die ganze Mannigfaltigkeit von Zuständen lässt sich in kontinuierliche und in diskrete Größen zerlegen, z.B. in mehr oder weniger lange Gebilde (z.B. Perlenschnüre) und in mehr oder weniger einzelne Objekte (z.B. mehr oder weniger Perlen). Diese Tatsachen sind auf das engste damit verbunden, dass zum Begriff der Quantität derjenige der Teilbarkeit gehört, den Aristoteles als wesentlich zur Bestimmung des Quantitätsbegriffes ansah. Der Begriff der Teilbarkeit führte Aristoteles zur Unterscheidung zwischen der Menge und der Größe, erstere diskret, letztere kontinuierlich. Das definierende Kriterium für Menge ist die Zählbarkeit, die Teilbarkeit in Teile, für Größe hingegen die Messbarkeit, wenn sie als Vielfaches einer Maß-Einheit angebar ist, z.B. ist ein Raumstück als Vielfaches eines

Längenstückes, das als Maß-Einheit fungiert, messbar. Das Maß ist nach Aristoteles dasjenige, wodurch das Quantitative überhaupt erkannt wird. Voraussetzung für die Zählbarkeit und die Messbarkeit ist aber, dass eine Einheit ausgezeichnet wird. Ob diese Einheit natürlich oder konventionell ist, hängt davon ab, ob man von der Einheit noch ein Mehr oder Weniger aussagen kann. Kann man dies nicht mehr, wie z.B. bei dem Planckschen Wirkungsquantum, dann kann man nur noch Aussagen über Vielfache machen. Die Zählbarkeit im strikten Sinne ist nur dann möglich, wenn sich die Einheit, im Sinne des Messvorganges als Eins interpretiert, nicht mehr unterteilen lässt. Wird die Einheit konventionell gebildet, also eine Eins auf einer willkürlichen Skala hergestellt, dann handelt es sich nach Aristoteles um Messbares.

Der Zusammenhang zwischen Quantität, Teilbarkeit und Zählbarkeit weist auf ein konstruktives, aktional-pragmatisches Moment hin, auf die Praxis des Messens, des Quantifizierens und des Zählens. Dies setzt aber schon quantitativ strukturierte Erfahrungen voraus. Kant hat im Rahmen seiner transzendentalphilosophischen Überlegungen zur Frage nach den Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung, in der Quantität eine Bedingung der Möglichkeit einer wissenschaftlichen Erfahrung gesehen. Des weiteren erkennt Kant "die Quantität als durchgängigen Vergleichsbegriff, d.h. die Größe wird zu einer relationalen Bestimmung" (Schäfer, 1973). Kant bestimmt Raum und Zeit als a priori gegebene Formen der Sinnlichkeit, welche Gegenstände erst überhaupt erfahrbar machen. Sie beinhalten reine, kontinuierliche Mannigfaltigkeiten, die in der Erkenntnis zu Einheiten synthetisiert werden. Die Kategorie der Quantität ist nach Kant ein synthetischer Akt, "in dem gemäß notwendigen Regeln das Mannigfaltige der Anschauung zur Einheit einer Größe gebracht wird" (Schäfer, 1973). Demzufolge lautet der erste "Grundsatz des reinen Verstandes": "Alle Erscheinungen sind ihrer Anschauung nach extensive Größen". Daher sind die Erfahrungsgegenstände quantifizierbar und deswegen lässt sich die Mathematik allgemein auf die Erscheinungen anwenden. Kant nennt dieses Axiom den "transzendentalen Grundsatz der Mathematik der Erscheinungen" (KrV A 165; B 208). Die Kategorie der Quantität ist somit nicht das Resultat mathematischer Praxis, sondern sie ermöglicht diese.

Auch phänomenale Qualitäten können quantifiziert werden, es sind intensive Größen, die durch den Grad bestimmbar sind (KrV A 166). Der Unterschied zu den extensiven Größen besteht darin, dass sie sich nicht in Teile zerlegen lassen, deren Zusammensetzung das Ganze dann wieder vollständig herstellt. Zur Variation der Teile tritt die Variation der Grade.

Nach Kant konstituiert sich die Quantität als synthetischer Akt in den Momenten Einheit, Vielheit, Allheit. Den Begriff der Größe legt Kant dahingehend fest, "dass sie die Bestimmung eines Dinges sei, dadurch, wie vielmal Eines in ihm gesetzt ist, gedacht werden kann" (KrV A, 242, B 300). Eine Größe ist erst dann bestimmt, wenn ihre Einheit und ihre Vielfachheit bestimmt sind. Jedoch setzt die Bestimmung einer Maßeinheit schon eine bestimmte Größe voraus. "Weil es aber in der Beurteilung der Größe nicht bloß auf die Vielheit (Zahl), sondern auch auf die Größe der Einheit (des Maßes) ankommt, und die Größe dieses letzteren immer wiederum etwas Anderes als Maß bedarf, womit sie verglichen werden könne: so sehen wir, dass alle Größenbestimmungen der Erscheinungen schlechter-dings keinen absoluten Begriff von einer Größe, sondern allemal nur einen Vergleichsbegriff liefern könne" (KU, §25, Akad.Ausg. Bd. V, S. 248). Die Bestimmung einer speziellen Größe ist nur möglich, wenn man weiß, wie groß beispielsweise ein Zentimeter oder eine Elle oder eine andere Einheit ist. "Bestimmtheit kann also nur dadurch in den Größenvergleich

kommen, dass ein bestimmtes Maß als Grundmaß in der Anschauung gegeben wird. Deshalb kann Kant sagen, dass alle Größenschätzung der Gegenstände der Natur zuletzt 'ästhetisch' ist, sofern man jemand einen Maßstab zeigen muss und sagen 'Das ist ein Meter'" (Schäfer, 1973).

1. 2. 3. Wahrnehmung von Quantitäten

Psychologisch betrachtet sind die Sinne demzufolge messende Erkenntniswerkzeuge. Wahrnehmungssysteme als Messinstrumente zu begreifen liegt implizit der klassischen Psychophysik zugrunde, deren Bestreben darin bestand, nicht nur ein psychisches Maß zu identifizieren, sondern Maßskalen für die unterschiedlichsten Dimensionen der Wahrnehmung (z.B. Größe, Helligkeit, Lautheit usw.) zu entwickeln (Mausfeld, 1994). Dieser Ansatz der Psychophysik, der auf Fechner (1860) zurückgeht, wird als dimensionale Psychophysik bezeichnet (Prinz, 1990). Deren Grundfrage ist, wie die 'objektiven' physikalischen Dimensionen in die ihnen entsprechenden 'subjektiven' Dimensionen übersetzt werde, was also die dimensionale Transformationsgleichung ist, die den physikalisch beschreibbaren Reiz mit dem wahrgenommenen beurteilten Reiz verknüpft. Wie hängt beispielsweise das physikalisch gemessene Gewicht mit dem wahrgenommenen Gewicht zusammen? Bedeutsam ist die von Fechner getroffene Unterscheidung von innerer und äußerer Psychophysik: Die innere Psychophysik befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen den Erregungszuständen oder -prozessen des Gehirns und dem wahrgenommenen Objekt. Allerdings können bis heute die hirnhysiologischen Prozesse nicht hinreichend genau erfasst werden, um sie eindeutig subjektiven Erlebnissen zuzuordnen, wobei letztere sowohl das wahrgenommene Objekt als auch dessen bewusste Beurteilung, aber auch nur die unbewussten Residuen einer Stimulation umfassen können. Da die hirnhysiologischen Erregungszustände in kausaler Verbindung mit der Reizung der Sinnesorgane stehen, so kann die innere Psychophysik zunächst durch die indirekte äußere Psychophysik vertreten werden. Die äußeren Reizverhältnisse können experimentell manipuliert werden.

Das methodische Ziel der klassischen Psychophysik ist, die Eigenschaften eines wahrgenommenen Gegenstandes genauso präzise zu bestimmen, wie dies bei einer physikalischen Messung möglich ist, also ein subjektives, psychisches Maß zu gewinnen.

Mit Hilfe eines Lineals lässt sich feststellen, dass ein Bleistift 10 cm lang ist. Häufig wird dieses Resultat als objektiv bezeichnet, was solange in Ordnung ist, als damit nicht eine epistemische Höherwertung des physikalischen Maßes einhergeht. Ein solches Maß ist zunächst ganz einfach dadurch objektiv, dass ein Referenzmaß existiert, das von jedem kompetenten Messenden angewendet zu den gleichen Resultaten führt. Es gibt jedoch keinen Grund anzunehmen, dass dieses intersubjektive Maß wirklicher oder wahrer wäre. Die mit einem Lineal gemessene Bleistiftlänge ist genauso eine Tatsache wie die subjektiv wahrgenommene Bleistiftlänge. Es ist nicht zulässig, aus der erheblich weniger reliablen subjektiven Längenwahrnehmung und der erheblich reliableren Linealmessung letztere für objektiv und wahr, und erstere für bloß subjektiv und täuschend zu halten. Die Reliabilitätsfrage ist eine rein empirische Frage und sollte von der erkenntnistheoretisch-philosophischen Frage nach der epistemischen Validität, ob die Behauptung wahr sei, die gemessene oder wahrgenommene Entität sei eine unabhängig vom menschlichen Geist existierender Sachverhalt, unterschieden werden.

Man kann also die Länge eines Bleistiftes auch ohne Lineal wahrnehmen, wobei es allerdings schwierig ist, diese Länge präzise durch Zahlen anzugeben. Sprachlich geben wir unsere Längenwahrnehmung durch Ausdrücke wieder, die meist Gleichheits- oder Ordnungsrelationen wiedergeben (z.B. "ziemlich lang", "etwas länger als mein Mittelfinger"), selten werden quantifizierende Ausdrücke verwendet (z.B. "doppelt so lange wie dieser Stummel"). Ein psychisches Maß setzt aber voraus, dass sich Zahlen reliabel bestimmten subjektiven Eindrücken zuordnen lassen. Fechner hat dazu einen Weg entwickelt, der von der üblichen Beurteilung eines Reizes abweicht. Statt einen Reiz vorzugeben, der genau zu beurteilen ist, gab Fechner einen subjektiven Eindruck vor und es waren diejenigen Reizverhältnisse gesucht, die diesen Eindruck erzeugen. Die Urteilsdimension ist hier die unabhängige Variable, die physikalische die abhängige. Um eine Skala zu konstruieren, die die physikalische Dimension durch Maßurteile repräsentiert, ist ein Nullpunkt und eine Maßeinheit vonnöten. Der Nullpunkt der Skala ist diejenige physikalische Größe des Reizes, die eine ebenmerkliche Empfindung, auslöst. Dieser Absolutschwelle entspricht eine physikalische Größe größer als Null. Auch für die Maßeinheit verwendete Fechner das Kriterium der Ebenmerklichkeit, mit der Differenz zweier Reizwerte auf einer physikalischen Dimension, die zu einem ebenmerklichen Empfindungsunterschied führt. Dieser Schwellenwert, die Unterschiedsschwelle, hat ebenfalls einen von Null verschiedenen Betrag. Damit ein Bleistift als ebenmerklich kleiner als ein anderer wahrgenommen wird, ist die Überschreitung einer bestimmten Mindestdifferenz der Länge (in cm) erforderlich. Fechner hat Methoden entwickelt, um diese Schwellenwerte zu bestimmen, auf die hier nicht eingegangen werden soll (vgl. Tack, 1983; Prinz, 1990). Die Ergebnisse dieses Forschungsprogrammes lassen sich wie folgt zusammenfassen: (1) Es gibt keine konstante Unterschiedsschwelle, sondern diese ist eine Funktion der absoluten Größe der zu vergleichenden Reize. (2) Das Verhältnis der Unterschiedsschwelle S zur Größe des Standardreizes S ist allerdings für die meisten Dimensionen konstant: $S/S = k = \text{konstant}$ (Webersches Gesetz). Beträgt beispielsweise für Gewichte der Weber-Bruch $k=0.03$, dann muss man einem Standardgewicht von $1000p$ ein Vergleichsgewicht von $30p$ hinzuaddieren, um beim Vergleichsgewicht einen ebenmerklichen Unterschied des Gewichtes feststellen zu können. (3) Trägt man beginnend mit der Absolutschwelle S_0 die ebenmerkliche Unterschiede (emU) in einem Koordinatensystem ab, mit den Reizwerten S auf der Abszisse und den Empfindungswerten E auf der Ordinate, dann ergibt sich eine psychophysische Funktion. Ist der Empfindungswert 1 derjenige Reiz, der um ein emU von S_0 verschieden ist, dann lässt sich durch Reihenentwicklung von $S_1=S_0 + kS_0$ und logarithmieren folgende psychophysische Funktionsgleichung aufstellen: $E = c \log S + C$, wobei $c = 1/\log(1+k)$ und $C = -\log S_0$, welche von der Weberschen Konstante abhängen. Diese funktionale Beziehung wird als Weber-Fechner Gesetz bezeichnet. (4) Es gibt nicht ein oder das psychische Maß schlechthin, z.B. psy, sondern es gibt so viele psychische Maße, wie es wahrnehmungsmäßig beurteilbare physische Dimensionen gibt. Man kann die Einschränkungen "wahrnehmungsmäßig" und "physisch" weglassen lassen, die implizieren, dass nur das, was als extrapsychischer Sachverhalt vorliegt, beurteilt werden kann. Es sind jedoch auch intraphänomenale Beurteilungen möglich, z.B. erinnerte Buchgrößen, die Stärke eines Wunsches usw. (zur intraphänomenalen Skalierung vgl. Heller, 1980). Alle Anwendungen von psychologischen Skalen beruhen auf dieser Annahme, wobei sich als größtes Problem die Isolierung einer homogenen Beurteilungsdimension herausstellt. Im Rahmen einer Theorie der

Beurteilungsfehler, die wiederum Teil einer Messtheorie sind, werden diese und andere Fragen behandelt.

Eine wichtiger Kritikpunkt an diesem Forschungsprogramm ist das Konzept der Schwelle, die von Fechner für einen realen Sachverhalt gehalten wurde. Die reale Existenz einer Schwelle setzt voraus, dass sich so etwas wie reine Empfindungen oder elementare Wahrnehmungen identifizieren lassen, die nicht mit Urteilen verbunden sind. Dies setzt eine Theorie über den Zusammenhang von Wahrnehmung und Urteil voraus. Wahrnehmung und Urteil sind nur im Rahmen bestimmter methodologischer Annahmen zu trennen (z.B. in der Signalentdeckungstheorie (Swets, 1964)). Dennoch birgt die Messgerätemetapher der Wahrnehmungssysteme die grundlegende heuristische Idee, dass auch die Sinne einen beschränkten Messbereich haben: es wird nur ein bestimmter Ausschnitt aus der energetischen Stimulation als Information extrahiert und eine bestimmte Messgenauigkeit erreicht, das was gerade noch identifiziert werden kann (absolute Schwelle) und derjenige Unterschied zweier Reize, der gerade noch festgestellt werden kann (Unterschiedsschwelle). Die Urteile würden in diesem Kontext als variable Eichungen der Messgeräte fungieren, die die Feinheit der Auflösung gelegentlich oder dauerhaft verändern könnten. Im Rahmen der Psychophysik wurden zahlreiche Studien durchgeführt, die belegen, dass Menschen und Tiere extensive und intensive Größen unterscheiden, seien es Gewichte (mit denen Fechner die Psychophysik empirisch begründete), Längen, Flächen, Volumina, Geschwindigkeit oder Helligkeit, Farbe, Lautheit, Süße oder Harzigkeit. Die psychophysischen Methoden, aus denen die subjektiven Skalierungsmethoden entwickelt wurden, beruhen im Kern alle auf der Diskrimination extensiver und intensiver Größen. Dies ist besonders bei den indirekten Verfahren deutlich, wo die Person den Reizen nicht direkt eine Größe zuordnen muss, sondern mit "gleich" oder Abstufungen von "größer" und "kleiner" urteilt. Zur Herstellung solcher Ordinalurteile sind verschiedene Methoden entwickelt worden (vgl. Hellbrück, 1993; Westermann, 1987; Tack, 1983). Eine schwerwiegende Kritik ist darin zu sehen, dass in der psychophysischen Funktion ein Maßstab verwendet wird, der aus Unterschiedsschwellen als Maßeinheit aufgebaut ist. Mit dieser Maßeinheit lässt sich der subjektive Abstand auf einer Dimension messen. Implizit wird angenommen, dass die subjektive Distanz auf Unterscheidbarkeit zurückgeführt werden kann. Die Bestimmung eines Abstandes macht das Vorhandensein von mindestens zwei Größen nötig, die sich voneinander unterscheiden lassen. Wäre dem nicht so, lägen sie gewissermaßen aufeinander, sodass keine Gerade zwischen ihnen gezogen werden könnte. Also ist die Unterscheidbarkeit eine notwendige Bedingung der Bestimmung eines Abstandes, aber keine hinreichende. Die Bestimmung eines Abstandes zwischen zwei Größen ist die Bestimmung der Art und Weise, wie sich diese beiden Größen unterscheiden. Neben der bloßen Unterscheidung zweier Größen muss nun auch der Unterschied, die subjektive Distanz, beurteilt werden. Eine Möglichkeit ist, die Distanz sukzessive zu halbieren. Trifft es zu, dass sich die subjektive Distanz auf Unterscheidbarkeit zurückführen lässt, dann muss diese subjektive Distanz durch Halbierungsurteile so unterteilt werden, dass die n emU's, die die subjektive Distanz ausmachen, in zweimal $n/2$ emU-Distanzen aufgeteilt werden. Diese Annahme konnte jedoch durch empirische Versuche nicht zufriedenstellend bestätigt werden.

Diese indirekte Methode, die die subjektive Größe von Reizen über ihre Unterscheidbarkeit ermittelt, findet in der sogenannten direkten Skalierung eine gewisse Ergänzung. Die direkten Methoden erfreuen sich in Form zahlreicher Ratingskalen deswegen großer Beliebtheit, da sie sich

auch auf komplexe Objekte und subjektive Dimensionen anwenden lassen. Entsprechend muss von einer großen Variationsbreite der zugrunde gelegten Urteilsdimensionen ausgegangen werden. Die Direktheit der Methode besteht darin, dass kein komparatives Urteil abgegeben wird, sondern ein absolutes, z.B. "Dieses Buch ist dick". Eine Eigenschaft wird einem Objekt direkt zugeordnet, wobei die Eigenschaften aus einer vorgegebenen Kategorie, z.B. Dicke stammen. Die beurteilende Person bedient sich Urteilkategorien, die sprachlich vorformuliert die absoluten Urteile zum Ausdruck bringen und die eine geordnete Übergangsreihe auf der Dimension kennzeichnen, wobei der Übergang zwischen den Polen der Maximal- und Minimalausprägungen gestuft ist. An diesem Punkt wird schon deutlich, dass die absoluten Urteile auf einer impliziten Vergleichsstruktur beruhen. Es wird keineswegs einfach das Maß des zu beurteilenden Gegenstandes schlechthin ermittelt, sondern diese messende Beurteilung hängt davon ab, welcher Maßstab gerade durch die sprachliche Repräsentation der Urteilkategorien sowie vor allem deren Anzahl und Variationsbreite, deren Polung usw. induziert wird. Des weiteren wird die Beurteilung dadurch beeinflusst, wie die Person über die Serie orientiert ist, d. h., ob sie beispielsweise weiß, mit welchen Eigenschaftsworten die Extremausprägungen der Reizserie benannt werden. Weiter spielt eine Rolle, ob solche Bezugssysteme durch die Vorerfahrung mnestisch stabilisiert sind. Die Frage nach der Induktion, der Anwendung, gedächtnismäßigen Stabilisierung und generell nach der Struktur solcher Bezugssysteme, stellt einen eigenständigen Forschungsbereich dar, auf den hier nicht näher eingegangen werden kann (vgl. Haubensak, 1985). Wichtig ist, dass auch diese direkten Methoden Annahmen über das Verhältnis von diskret-metrischen Urteilen zu dem subjektiven Maßkontinuum machen müssen. Eine wichtige Annahme ist, dass die beurteilenden Personen n Reize mit Hilfe von n Urteilkategorien so in subjektiv gleich große Bereiche aufteilen, dass die subjektiven Abstände zwischen zwei benachbarten Urteilen, z.B. "sehr laut" und "laut" gleich groß sind. Folglich wird die Skala von der forschenden Person, und nicht von der urteilenden Person hergestellt, wobei erstere über Theorien verfügen muss, wie Urteileigenschaften durch Zahleigenschaften repräsentiert werden können. Die urteilende Person kann sogar gebeten werden, ihre Beurteilung auf eine numerische Skala abzubilden. Es kann beispielsweise eine numerische Bestimmung vorgegeben werden, wie X soll doppelt so groß sein wie A . Vorausgesetzt wird zum einen, dass die Personen in der Lage sind, Reize direkt so zu beurteilen, dass unmittelbar eine Verhältnisskala resultiert. Insbesondere wird vorausgesetzt, dass die beurteilende Person in der Lage ist, Zahlaspekte, ihre Relationen auf dem Zahlenstrahl als neutrale Größen zu repräsentieren und diese dann in benannte Zahlen, in Zahlurteile auf die Urteilsdimension abzubilden. Die Wahrnehmungsurteile müssen eindeutig den Zahlenrelationen entsprechen. Solche Annahmen sind jedoch durchaus fragwürdig (vgl. Poulton, 1989).

1.3 Entwicklungspsychologischer Zusammenhang zwischen Anzahl-Perzeption und Zahlkonzept

Psychophysische Methoden erbrachten den Befund, dass Menschen und Tiere diskrete Quantitäten, Anzahlen, phänomenale Mengen, voneinander unterscheiden oder deren Gleichheit feststellen können (zumindest im Sinne einer Nichtunterscheidbarkeit zweier Mengen) (Kaufman et al., 1949; Davis & Pérusse, 1988). Demzufolge findet schon auf der Ebene der Wahrnehmung eine Quantifizierung diskreter Größen statt, was oft in Verbindung mit Zählen gebracht wird. Bei Tieren

handelt es sich nicht um verbales Zählen, was die Frage aufwirft, ob es nonverbale, nonsymbolische Zählprozesse gibt. Damit ist ersichtlich, dass sich numerische Kompetenzen in dem Bereich von perzeptiven Anzahl-, Mengenunterscheidungen bis zu dem symbolisch, logisch-mathematisch elaborierten Zahlkonzept bewegen. An dieser Stelle drängen sich entwicklungspsychologische Überlegungen geradezu auf, ob sich eine entwicklungsmäßige Übergangsreihe von der perzeptiven Mengenerfassung bis hin zur symbolisch-sprachlichen Zählkompetenz identifizieren lässt. Angelehnt an Davis & Pérusse (1988) soll von den in Tab. 1 dargestellten Schlüsselprozessen der numerischen Kompetenz ausgegangen werden.

Davis & Pérusse (1988) erwähnen noch das Protozählen (protocounting), das weggelassen wird, da die Zuschreibung eines solchen Prozesses vom Vorliegen echten Zählens ausgeht, wenn die Unterscheidung von größer und kleiner (Tab. 1, A.) und das Subitizing (Tab. 1, B.) ausgeschlossen werden können. Ohne das Vorliegen einer positiven Evidenz für echtes Zählen sollte nicht von Zählen ausgegangen werden, da man nie sicher sein kann, dass nicht doch ein weiterer Prozess involviert ist. Schließlich läuft die Prüfung des Vorliegens von Protozählen darauf hinaus, die Nullhypothese zu testen, also nachweisen zu müssen, dass kein echtes Zählen vorliegt.

1.4 Kurzer Überblick über die folgenden Kapitel

In den folgenden Kapiteln wird herausgearbeitet, dass die Wahrnehmung von Anzahlen die Grundlage numerischer Kompetenzen ist. Dazu ist es notwendig, die Wahrnehmung von Anzahlen vom Zählen abzugrenzen, weswegen in *Kapitel 2* eine theoretische Darstellung der Domäne "Zahl" erfolgt. In *Kapitel 3* werden die Erklärungsansätze des Subitizing dargestellt und Experimente präsentiert, die belegen, dass Subitizing nicht auf Zählen basiert, sondern die Resultante früher visueller Wahrnehmungsprozesse ist. Das Wahrnehmen und Erkennen von Anzahlen ist eine Art der numerischen Kompetenz, die scharf von der konzeptuellen Kompetenz des Zählens abgegrenzt werden muss. Die Notwendigkeit dieser Abgrenzung wird durch eine Reihe von Befunden aus der Säuglingsforschung zur Frage der frühesten Entwicklung numerischer Kompetenzen belegt (*Kapitel 4*). Aufbauend auf grundsätzlichen methodologischen Überlegungen zur Säuglingsforschung werden eigene Experimente vor diesem Forschungshintergrund präsentiert. Die Fragestellung dieser Experimente zielt zum einen auf die Grenze des exakten Unterscheidens von Anzahlen ab und zum anderen wurde untersucht, ob sich die Befunde aus der visuellen Domäne auch im Bereich der auditiven bei Säuglingen finden lassen. Das Erkennen von Anzahlen bei Säuglingen wird als pre-counting subitizing interpretiert sowie unter allgemein- und entwicklungspsychologischen Aspekten, insbesondere vor dem Hintergrund eines Zählentwicklungsmodelles diskutiert (*Kapitel 5*).

Tabelle 1-1: Schlüsselprozesse der numerischen Kompetenz (nach Davis & Pérusse, 1988)

A. Wahrnehmungsurteile über relative Anzahlen	Die Beurteilung der relativen Anzahl beruht auf der Feststellung von Gleichheit oder Ungleichheit. Diese wird durch den dichotomen Vergleich von mehr versus weniger generiert und liefern kein Wissen über die absolute Anzahl.
B. Subitizing	S. bezeichnet die schnelle Zuweisung einer numerischen Marke zu einer kleinen Menge von Items, die meistens deutlich unter sechs liegt. S. lässt sich als ein Mechanismus der perceptiven Gliederung in eine kleine Anzahl distinkter Einheiten verstehen, ein Prozess, der nichts mit dem Zählen zu tun hat. Typischerweise lässt sich S. bei visuell-simultan präsentierten Items identifizieren, prinzipiell erscheint sequentielles S. möglich, gelegentlich wird die rhythmische Gliederung damit in Zusammenhang gebracht, obgleich auditives S. kaum nachgewiesen und erforscht ist.
C. Schätzen	S. wurde von Kaufman et al. (1949) als der Prozess definiert, der jenseits der Subitizing-Grenze auftritt. Die Itemanzahl kann zwar als Gruppe wahrgenommen, aber nur eine Teilmenge von Items kann vereinzelt werden. Die Zuweisung einer Zahlmarke basiert auf einem mehr oder weniger diffusen Mengeneindruck, bei welchem nicht nur die Anzahl der Items, sondern auch die belegte Fläche, der Gesamtkontrast usw. herangezogen werden kann.
D. Zählen	Z. ist der Prozess, der zur Feststellung der Kardinalzahl vonnöten ist. Minimal erforderlich ist es, eine reliabel geordnete Reihe von Marken in eine Eins-zu-Eins-Korrespondenz mit den zu zählenden Items zu bringen. Z. impliziert die Möglichkeit der infiniten Aufzählung.
Zahlkonzept	Das Z.k. ist eine Eigenschaft, die zugeschrieben kann, wenn alle formalen Kriterien des Zählens erfüllt sind. Es handelt sich um eine abstrakte, amodale Fähigkeit, die sich in der Beherrschung der unterschiedlichsten Zahlaspekte niederschlägt.

2 Theoretische Bestimmung der Domäne "Zahl"

2.1 Zahlaspekte

Wie bereits erwähnt, ist die Untersuchung einer psychologischen Kompetenz an die Struktur der betreffenden Domäne gebunden. Da in der vorliegenden Untersuchung die Zählkompetenz im Mittelpunkt steht, werden in diesem Kapitel die relevanten Aspekte der Domäne "Zahl" dargestellt und erörtert.

Vom Vorliegen eines Zahlkonzeptes kann dann gesprochen werden, wenn eine Person die Bedeutung von Zahlzeichen versteht, diese rezipieren und reproduktiv sowie produktiv anwenden kann. Zu den Zahlzeichen gehören die Numeralia, die gesprochenen und geschriebenen Zahlwörter, die zwar je nach Sprache verschieden sind, aber die gleiche Bedeutung haben (z.B. "zwei", "two", "deux", "kaksi" usw.) und die Ziffern, von denen heute die arabischen in Gebrauch sind. Die Ziffern lassen sich als Einzelziffern (z.B. "8"), als Ziffernfolgen der Zahldarstellung in einem Zahlensystem (z.B. "1063") und als Zahltermen (z.B. " $20 * 4 + 7$ ") darstellen. Die Struktur des Zahlkonzeptes ist semiotischer Natur und lässt sich in einen semantischen, einen syntaktischen und einen pragmatischen Bereich unterteilen. Der semantische Bereich umfasst z.B. das Wissen, wofür die arabischen Ziffern stehen. Eine Ziffer wie "4" repräsentiert beliebige Entitäten, z.B. "||||", die abgezählt werden können. Es repräsentiert aber auch sprachlich ein Zahlwort, das aus bestimmten Phonemen und aus bestimmten Graphemen besteht. Der syntaktische Bereich umfasst zum einen die Relationen, die in Ziffernfolgen und Zahltermen zum Ausdruck kommen, also beispielsweise die Regeln des Dezimalsystems und Regeln des Rechnens; zum anderen umfasst er die syntaktischen Regeln der sprachlichen Numeralkonstruktionen, um die unterschiedlichen Zahlaspekte zu benennen, z.B. "In der Dose liegen vier Zuckerstückchen" oder "Hans ist vierter geworden". Der pragmatische Bereich umfasst den kommunikativen Umgang mit Zahlen, das Messen und das Darstellen von Sachverhalten mit Hilfe von Zahlen, z.B. Statistiken oder DIN-Normen.

Im weitesten Sinne gehört auch die wissenschaftliche Beschäftigung mit Zahlen in der Mathematik und der Philosophie zum pragmatischen Bereich. Im 19. und 20. Jahrhundert wurden in der Mathematik unterschiedliche Interpretationen der Zahl entwickelt, insbesondere im Versuch, die Mathematik auf rein logischer Grundlage aufzubauen. Cantor, Frege und Russel beispielsweise stellten die kardinale Bedeutung der Zahl, vom klassenlogischen Aspekt ausgehend, in den Mittelpunkt. Die Zahl wurde über den Mengenbegriff als Klasse zueinander äquivalenter Mengen definiert, die Zahl wurde also als Eigenschaft einer Menge und der Begriff der Menge als grundlegend im Aufbau der Mathematik angesehen (Russel, 1924). Ausgehend von den Problemen, die sich beim mengentheoretischen Aufbau der Mathematik stellten, den sogenannten Russel'schen Antinomien, wurde der Strukturbegriff zentral, der die unterschiedlichen Teilgebiete der Mathematik wie Geometrie, Topologie, Zahlentheorie oder Algebra, unter einem leitenden Gesichtspunkt aufeinander zu beziehen erlaubt.

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden mehrere unterschiedliche Bedeutungen mit dem Gebrauch von Numeralia und Ziffern verbunden. Hier einige Beispiele, welche nach Maier (1990) fünf wichtigen Bedeutungskategorien der Zahlen zugeordnet werden können:

- (1.) "In der Schale liegen 5 Nüsse". - "Die Ferien haben fünf Tage gedauert."
- (2.) "Ich habe 5 l Milch gekauft". - "Diese Schnur ist fünfmal so lange wie die andere."
- (3.) "Sie hatte beim Skirennen die Startnummer 5." - "Der fünfte von links heißt Hans." - "Eins, zwei, drei, vier, fünf, sechs, sieben, wo ist denn der Hans geblieben?"
- (4.) "5 ist Nachfolger von 4" - " $5 < 9$ " - " $5 > 3$ "
- (5.) "5 ist die Hälfte von 10" - " $5 = 3+2$ " - " $5 = 7-2$ "

Diese fünf Zahlaspekte lassen sich nach Maier (1990) folgendermaßen beschreiben:

- (1.) Geben Zahlzeichen oder Zahlwörter an, wieviele einzelne Objekte zu einer (endlichen) Kollektion gehören, werden also Zahlen als Anzahlen benutzt, liegt der *kardinale Zahlaspekt* vor. Die Anzahl ist die Antwort auf die Frage "Wieviele X sind in der Menge Y enthalten?"
- (2.) Geben Zahlzeichen oder Zahlwörter an, das Wievielfache eine Größe bezogen auf eine als Einheit genommene Größe ist, werden Zahlen also als Maßzahlen benutzt, dann kann man vom "*Operatoraspekt*" der Zahlen sprechen.
- (3.) Geben Zahlzeichen oder Zahlwörter den Rangplatz an, den ein Objekt in einer geordneten Serie von Objekten einnimmt, oder wenn sie selbst in einer Serie geordnet, Zahlen also als Ordnungszahlen oder Zählzahlen benutzt werden, kann man Maier (1990) zufolge vom "*konstruktiven Zahlaspekt*" sprechen.
- (4.) Geben Zahlzeichen oder Zahlwörter Ordnungsrelationen zwischen Zahlen an, insbesondere Vorgänger- oder Nachfolgerbeziehungen und Kleiner-Größer-Beziehungen, so steht der "*ordinale Zahlenaspekt*" im Vordergrund.
- (5.) Dienen Zahlzeichen oder Zahlwörter dazu, Operationen zwischen Zahlen zu bezeichnen, insbesondere solche, die sich mit den Operationen Addition und Subtraktion herstellen lassen, so wird nach Maier (1990) vom "*algebraischen Zahlaspekt*" gesprochen.

Diese einzelnen Aspekte des Zahlbegriffes sollen in den folgenden Unterkapiteln, angelehnt an Maier (1990), dargestellt werden.

2. 1. 1 Der kardinale Zahlaspekt

Grundlegend für den kardinalen Zahlenaspekt ist der Begriff der Menge als die Zusammenfassung von unterschiedenen Objekten zu einer Objektkollektion. Diese zusammengefasste Ganzheit kann man abzählen, die Menge von Objekten ist also eine Voraussetzung des Zählens. Um abzählen zu können, muss man über eine Menge von Zählzeichen verfügen und Kriterien haben oder festlegen, was alles abgezählt werden soll. Die Menge ist also nicht nur eine Voraussetzung des Zählens, sondern auch eine durch Abzählen erzeugte und dadurch zahlenmäßig bestimmte. Es stellt sich nun die Frage, wie man im Rahmen eines begrifflichen, axiomatischen Aufbaus von Mengen zu Anzahlen kommt. Diese Verbindung wurde in der mathematischen Logik durch logische Aussageformen hergestellt, die mindestens eine Variable enthalten. Wird ein Wort in die Variable eingesetzt, meist eine Subjektbezeichnung vom Typ eines Eigennamens, entsteht eine Elementaraussage. Die Struktur einer Elementaraussage besteht aus Subjekt und Prädikat. Beispielsweise kann eine Aussageform, bestehend aus dem Prädikator "x ist eine gerade Zahl", durch Einsetzen der Subjektbezeichnung "8" in "x" in eine Elementaraussage $P(8)$ überführen, wobei $P(x)$ dann die Aussageform symbolisiert. Über eine Elementaraussage kann das Urteil gefällt werden, ob sie den Wahrheitswert "wahr" oder "falsch" zugeordnet bekommt. Dies ist nur möglich, wenn in die Subjektvariable x der Eigenname eines Objektes aus einem bestimmten Bereich eingesetzt wird, z.B. "4" oder "3", wobei $P(3)$ eine falsche, $P(4)$ und $P(8)$ wahre Aussagen wären. Ob eine Aussageform in eine sinnvolle Aussage überführt werden kann, hängt folglich von der Wahl des Grundbereiches ab, aus dem die Objekte ausgewählt werden. Diejenigen x aus dem Grundbereich, die zu sinnvollen Aussagen führen, bilden eine Menge. Bezeichnet beispielsweise A den Prädikator "x ist eine Primzahl", $A(x)$ die entsprechende Aussageform über den Grundbereich \mathbb{N}^{30} der natürlichen Zahlen bis 30, dann ist $A(x)$ wahr für die Zahlen 2,3,5,7,11,13,17,19,23,29. Gehört das Objekt zur Menge, das die Aussageform erfüllt (Definitions- oder Erfüllungsmenge), dann ist es Element der Menge. Diese Elemente können einfach alle aufgezählt werden, was aber bei großen Mengen Schwierigkeiten macht, weswegen Mengen üblicherweise folgendermaßen gekennzeichnet werden:

$$A = \{ x \in \mathbb{N}^{30} \mid x \text{ ist eine Primzahl} \}$$

Gelesen heißt das: "A ist die Menge aller x aus \mathbb{N}^{30} , für die gilt: x ist eine Primzahl", wobei \mathbb{N}^{30} die Menge bezeichnet, aus der die Aussageform erfüllenden Objekte zu entnehmen sind.

Der Zusammenhang zwischen Aussageform und Menge ist folgender: Das Prädikat der Aussageform legt fest, welche Subjekteinsetzungen zulässig sind. Damit wird die Menge im Sinne einer Zusammenfassung von Objekten, die die Prädikatsbedingung erfüllen, festgelegt. Es ist möglich, dass unterschiedliche Prädikate die gleichen Mengen haben:

$$B(x) = x \text{ ist Vielfaches von } 3$$

$$C(x) = x \text{ hat die Quersumme } 3$$

Die Mengen beider Prädikate sind hinsichtlich ihres Wahrheitswertes äquivalent, sie haben den gleichen Umfang: $B(x) \approx C(x)$. Der Begriff der Menge ist also allgemeiner und abstrakter als der des Prädikats einer Aussageform, da er eine Klasse von Prädikaten "bedeuten" kann. Da beide Mengen elementengleich sind, gilt auch: $B(x) = C(x)$. Dieser Sachverhalt wird in der Mengentheorie als Extensionalitätsaxiom bezeichnet: Zwei Mengen sind genau dann gleich, wenn sie dieselben Elemente haben. Das Aussonderungsaxiom legt die Mengenbildung fest: Zu jeder Erfüllungsmenge G

(Grundmenge) und jeder Aussageform $P(x)$ in G gibt es eine Menge P , deren Elemente genau jene x aus G sind, die eingesetzt in $P(x)$, diese Aussageform zu einer wahren Aussage machen.

Die Gleichheitsrelation zwischen zwei Mengen zeigt, dass Mengen einen quantitativen Vergleich gestatten. Zum Vergleich von Mengen kommt man, indem man von mehrstelligen Aussageformen, R , ausgeht, wobei die Menge der Stellen einer n -stellige Relation bildet. Die einfachste mehrstellige Aussageform R ist die zweistellige xRy , aus der sich jene Paare (x,y) bilden lassen, für welche xRy wahr ist. Die Menge dieser Paare bildet eine binäre Relation. Sei $x \in A$ und $y \in B$, so heißt A Vorbereich, B Nachbereich der binären Relation. Die Menge aller Paare, die sich mit den Elementen von A und B bilden lassen, heißt Cartesisches Produkt. Dieses bildet die Erfüllungsmenge oder Definitionsmenge derjenigen Paare (x,y) für die xRy wahr ist. Sind der Vor- und der Nachbereich die gleiche Menge, so spricht man von einer Relation in einer Menge. Zum Begriff der Zuordnung oder Abbildung kommt man, indem man Elemente des Vorbereiches Elementen des Nachbereiches zuordnet. Jede Abbildung ist eine Relation und es werden im folgenden nur eindeutige Relationen betrachtet, Relationen, die jedem Element des Vorbereiches ein und nur ein Element des Nachbereiches zuordnen. Es können dann folgende Abbildungen unterschieden werden:

Eine Abbildung heißt injektiv, wenn jedes Element des Nachbereiches höchstens einem (d.h.genau einem oder keinem) Element des Vorbereiches zugeordnet ist. Beispiel: Jeder natürlichen Zahl x wird ihr Quadrat y zugeordnet ($R = \{ (x,y) \in \mathbb{N} * \mathbb{N} \mid x = y^2 \}$). Allerdings braucht nicht jedes Element des Nachbereiches einem Element des Vorbereiches zugeordnet zu sein.

Eine Abbildung heißt surjektiv, wenn jedem Element des Nachbereiches ein Element des Vorbereiches entspricht. Diese Abbildung ist nicht injektiv, da es mindestens ein Element des Nachbereiches gibt, dem mehr als ein Element des Vorbereiches entspricht. Es können sogar jedem Element des Nachbereiches unendlich viele Elemente des Vorbereiches zugeordnet werden. Beispiel: ($R = \{ x \in \mathbb{N} \text{ und } y \in (0, 1, 2, 3, 4) \mid \text{“}x \text{ geteilt durch } 5 \text{ lässt Rest } y\text{”}$). Hier entsprechen jedem y des Nachbereiches unendlich viele x des Vorbereiches.

Eine Abbildung heißt bijektiv, wenn sie sowohl injektiv als auch surjektiv ist. Es handelt sich um eine umkehrbar eindeutige oder paarweise oder 1:1-Zuordnung, jedem Element des Vorbereiches entspricht genau ein Element des Nachbereiches und umgekehrt. Beispiel:

$\{ x \in \text{“}20 \text{ Wettkampfteilnehmer” und } y \in (1,2,\dots,19,20) \mid \text{“}x \text{ trägt Startnummer } y\text{”}$).

Mit Hilfe von bijektiven Abbildungen oder paarweisen Zuordnungen lässt sich ein quantitativer Mengenvergleich nach folgender Fallunterscheidung durchführen:

1. Fall: Es wird eine paarweise Zuordnung der Elemente einer Menge A und der einer Menge B durchgeführt. Es gibt eine paarweise Zuordnung zwischen A und einer echten Teilmenge von B . Dann hat B mehr Elemente als A , da mindestens ein Element “alleine” bleibt.
2. Fall: Es wird eine paarweise Zuordnung einer Menge A und einer Menge B durchgeführt. Es gibt eine paarweise Zuordnung zwischen B und einer echten Teilmenge von A . Dann hat A mehr Elemente als B , da mindestens ein Element “alleine” bleibt.
3. Fall: Es wird eine paarweise Zuordnung einer Menge A und einer Menge B durchgeführt. Es gibt eine paarweise Zuordnung sowohl zwischen B und A als auch zwischen A und B . Die Mengen A und B haben gleich viele Elemente, da kein Element von A oder B “alleine” bleibt.

Liegt der Fall 3 vor, so nennt man Mengen A und B äquivalent ($A \approx B$). Angenommen, man habe nun ein Kollektion von Mengen vorliegen und möchte eine Unterkollektion von Mengen bilden, die

einander äquivalent sind. Dies wird durch paarweises Vergleichen zweier Mengen dergestalt erreicht, dass man beide Mengen auf umkehrbar eindeutige Zuordnung ihrer Elemente prüft. All die Mengenpaarlinge, die den Test erfüllen, bilden eine Klasse äquivalenter Mengen, eine Äquivalenzklasse. Jede dieser Klassen vertritt eine Kardinalzahl. Die Kardinalzahl oder Anzahl im Falle endlicher Mengen ist jene Eigenschaft, die sie mit allen ihr äquivalenten Mengen gemeinsam hat.

Natürliche Zahlen lassen sich somit als Anzahlen oder Kardinalzahlen auf zweierlei Weise deuten: intensional als Eigenschaft von Mengen und extensional als Klassen äquivalenter Mengen, als Äquivalenzklassen. Die Abstraktion des kardinalen Zahlenaspektes wird dadurch gewonnen, dass von Grundelementen (Elementen erster Ordnung) im Sinne von individuellen Entitäten (Begriffen, Objekten) ausgegangen wird, die als nicht weiter unterteilbare Ganzheiten, als Zählheiten, genommen werden. Im ersten Schritt werden diese Elemente erster Ordnung zu Mengen zusammengefasst, die als Elemente zweiter Ordnung zu sehen sind. Sie umfassen nicht nur Grundelemente, sondern können selbst wieder als eigenständiges Objekt oder Element behandelt werden. Im zweiten Schritt werden die Kardinalzahlen als Begriff der Elemente zweiter Ordnung gebildet, der eine Mengeneigenschaft angibt. Die Kardinalzahlen sind Mengenmengen, Klassen von Mengen, z.B. die Klasse aller Zweier-Mengen.

2. 1. 2 Der Operatoraspekt der Zahlen

Der Operatoraspekt der Zahlen bezieht sich auf den Vergleich von Größen, die in diskrete und kontinuierliche unterteilt werden. Zu den diskreten Größen gehört die Anzahl von Mengen, zu den kontinuierlichen Größen Längen, aber auch Flächeninhalte, Volumina oder Zeitmaße. Nach Maier (1990) lassen sich Größen gleicher Art z.B. Längen, unter dem Begriff des Größenbereiches zusammenfassen, der die folgenden Eigenschaften hat:

- Elemente des Bereiches kann man ordnen, es ist die *Ordnungsrelation* "kleiner als" (" $<$ ") definiert.
- Bezogen auf die Ordnungsrelation gilt das *Trichotomiegesetz*. Für zwei Elemente des Größenbereiches gilt genau eine der drei folgenden Aussagen: $a < b$ oder $b < a$ oder $a = b$.
- Größen lassen sich zusammensetzen und zerlegen. Im Größenbereich ist also eine *Operation* "plus" (" $+$ ") definiert, und er ist bezüglich dieser Operation abgeschlossen. Zu a und b gibt es ein c mit $a + b = c$.
- Es gilt das *Kommutativgesetz der Addition*: $a + b = b + a$.
- Die Größen sind *positiv*. Es gibt ein x mit $a + x = b$ dann und nur dann, wenn $a < b$.

Da man Größen ordnen kann, braucht man Verfahren, um für zwei Größen a und b entscheiden zu können, welcher der drei Fälle der Trichotomie vorliegt. Es ist beispielsweise möglich, physikalische Repräsentanten von a und b direkt zu vergleichen, so dass man auf die Beziehung zwischen a und b schließen kann, z.B. ob eine Strecke a und eine Strecke b auf einem Strahl gleichlang sind oder ob a kürzer als b oder a länger als b ist. Für alle Größenbereiche gibt es spezielle Größenvergleichsverfahren, z.B. müssen Flächen in paarweise kongruente Teilflächen zerlegt werden.

Man kann auch zeigen, dass Kardinalzahlen (Anzahlen) ebenfalls Größen sind, deren Repräsentanten Mengen sind, die sich mittels umkehrbar eindeutiger Zuordnung vergleichen lassen.

Zahlen als "Operatoren": Da sich in einem Größenbereich Elemente addieren lassen, ergibt sich als Sonderfall der Addition die Vervielfachung einer Größeneinheit. So kann aus einer Längeneinheit e durch Addition $e+e+e+e+e$ die Länge l hergestellt werden, was sich mit $5 \cdot e$ abkürzen lässt. Die Vervielfachung einer Größe G mit einer natürlichen Zahl n lässt sich als Summe aus n Summanden G auffassen, kurz: $n \cdot G = G + G + G \dots + G = H$. Gedeutet als Zuordnungsvorschrift ist G der Ausgangszustand, auf den der Operator " $\cdot n$ " angewandt wird, der G in den Endzustand H überführt.

Zahlen als Maßzahlen: Geht man von einem Anfangszustand E und einem Endzustand F aus, so ist der Operator gesucht, der E in F überführt. Vorausgesetzt wird, dass F ein Vielfaches von E ist. Auf der Ebene der Repräsentanten wird geprüft, wie oft E in F enthalten ist, F wird über E gemessen. Der Operator " $\cdot x$ " gibt dann das Maß von F in E - Einheiten an.

Zahlen als Verhältniszahlen: Sind die Größen Kardinalzahlen, dann wird das Verhältnis von Größen folgendermaßen angegeben: Die Anzahl a repräsentiere die Menge M , b die Menge N ; ist b ein Vielfaches von a , so wird das Anzahlverhältnis mit " n zu 1" oder " $1:n$ " angegeben.

Vom Operatoraspekt der Zahlen ist also immer im Zusammenhang der Messung von Größen durch eine Einheitsgröße die Rede, wenn natürliche Zahlen zur Vervielfachung von Größen oder zur Darstellung von Größenverhältnissen verwendet werden. Die Zahl ist ein Maß des Vergleichs von Größen derselben Art und dient der Benennung des Messresultates. Im Operatoraspekt der Zahl wird durch die Maßzahl die Kardinalzahl mit der Größe verbunden.

2. 1. 3 Der konstruktive Zahlaspekt

Der konstruktive Zahlaspekt steht in enger Verbindung mit der logischen Analyse der Zählhandlung, die lange vor der axiomatischen Grundlegung der Mathematik kulturelle Praxis war. Besonders bekannt ist die axiomatische Darstellung der Menge der natürlichen Zahlen N nach Giuseppe Peano. Die Menge der natürlichen Zahlen enthält ein ausgezeichnetes Ausgangselement, die 1. Mengentheoretisch dargestellt lautet das erste Axiom (angelehnt an Maier, 1990): (I) $1 \in N$. Da man beim Zählen prinzipiell immer wieder eine Einheit hinzufügen kann, kommt man nie zu einer letzten Zahl, weswegen gilt: (II) Jedes $n \in N$ hat einen Nachfolger $n' \in N$. Mengentheoretisch ist n' das Bild von n , $n \rightarrow n'$, eine injektive Abbildung, der Operator $+1$ erzeugt n' als $n+1$. Die Menge aller Nachfolger ist eine Teilmenge von N . Allerdings sind nicht alle natürlichen Zahlen Nachfolger, die Ausnahme ist das Anfangselement 1, für welches gilt: (III) $n' \neq 1$. Das Zählen führt nicht auf die 1 zurück und die erreichten Zahlen kehren beim Zählen niemals wieder. Zählen ist also nicht zyklisch, es wiederholt sich keine Zahl, sondern es werden stets neue Zahlen hergestellt. Im Peano-Axiom (IV) wird dieses fortwährende Inkrementieren von Zahlen dadurch ausgedrückt, dass jede natürliche Zahl höchstens einen Vorgänger hat, dass also gleiche Nachfolger der gleichen Vorgängerzahl entspringen

sind: (IV) $n' = m' \rightarrow n = m$. Aus diesen Axiomen ist ableitbar, dass jede zu 1 verschiedene Zahl einen Vorgänger hat. Um dies abzusichern, muss ein weiteres Axiom hinzugefügt werden, um \mathbb{N} auf die durch sukzessives Zählen erreichbaren Zahlen zu beschränken: (V) Enthält eine Menge M natürlicher Zahlen sowohl 1 als auch die Nachfolger aller ihrer Elemente, so gilt $M = \mathbb{N}$.

Dieser Schluss basiert auf dem Prinzip der vollständigen Induktion, das sich Maier (1990) zufolge so darstellen lässt: $1 \in M \rightarrow 2 \in M, 2 \in M \rightarrow 3 \in M, 3 \in M \rightarrow 4 \in M$ usw. Da M alle Zahlen des Zählens enthält, ist M mit der Menge \mathbb{N} der natürlichen Zahlen identisch.

Einen anderen, konstruktivistischen Aufbau der Arithmetik entwickelte Paul Lorenzen (1974). Ihm zufolge ist das Zählen eine elementare Handlung, über das mit Strichlisten Protokoll geführt werden kann. Zahlen sind dann die Namen solcher Strichlisten. Die Konstruktionsregel lautet in der Originalsymbolik folgendermaßen (nach Maier, 1990):

$$\begin{aligned} & \text{=====} > | \text{ (zu lesen als "konstruiere |")} \\ n \text{ =====} > n| \text{ ("zu n konstruiere n|")} \end{aligned}$$

Man beginnt mit der Einheitsfigur " $|$ " und konstruiert dann aus dem Zahlzeichen n , das für irgendeine Folge von Strichen stehen kann, durch Anfügen der Einheitsfigur ein weiteres Zahlzeichen ("aus der Ziffer n konstruiere man den Nachfolger $n|$ "). Das Symbol n kann z.B.

" $|||$ " bedeuten, so dass dann " $n|$ " für " $||||$ " steht.

2. 1. 3. 1 Zählen, Auszählen und Abzählen

Wie schon erwähnt, können jeder natürlichen Zahl Zahlzeichen, Zahlworte und Ziffern zugeordnet werden. Zählen im Deutschen heißt, Numeralia, die am Zehnersystem ausgerichtet sind, in der Reihenfolge der natürlichen Zahlen zu produzieren. Meist von 1 ausgehend wird eine endliche Folge von Zahlzeichen verwendet, ein sogenannter Abschnitt A der natürlichen Zahlen: $A = \{ 1, 2, 3, 4, \dots, n \} = \{ x \in \mathbb{N} \mid x \leq n \}$. Mit Hilfe eines solchen Abschnittes kann ein Namen (Zahlzeichen, Ziffer, Zahlwort) für die Kardinalzahl (Anzahl) einer Menge gefunden werden. Dieses Verfahren nennt man das Aus- oder Abzählen der Elemente einer Menge M . Es funktioniert folgendermaßen: Aus M wird ein beliebiges Element ausgewählt, welchem das Zahlzeichen "eins" zugeordnet wird. Falls vorhanden, wird dem nächsten beliebigen Element das Zahlzeichen "zwei" zugeordnet. Dieses Verfahren wird solange durchgeführt, bis alle Elemente einen und nur einen Zahlnamen haben, der sukzessive aus der Zählreihe vergeben wurde. Es wird also eine umkehrbar eindeutige Zuordnung zwischen den Elementen der Menge M und einem Abschnitt A der natürlichen Zahlen hergestellt.

Folglich ist es gleichgültig, welchem Element welcher Zahlennamen zugeordnet wird, solange die Zahlennamen in der natürlichen Zählreihenfolge lückenlos vergeben werden und jeder Zahlennamen nur einmal vorkommt. Dieses Zuordnungs- und Benennungsverfahren von Elementen mit Zahlzeichen prägt der Menge M eine bestimmte Ordnung auf und lässt den Aspekt der Ordnungszahl in den Vordergrund treten.

2. 1. 3. 2 Zahlen als Kennzeichnung eines Ranges

Zahlen können folglich auch zum Ordnen von Mengen verwendet werden. Ein Beispiel wäre die Vergabe von Startnummern bei einem Wettlauf. Angenommen, es gibt 20 Teilnehmer, so ordnet man ihnen umkehrbar eindeutig die Zahlzeichen des Abschnittes A^{20} der natürlichen Zahlen zu. Die Menge der Teilnehmer ist dann nach ihren Startplätzen geordnet. Üblicherweise werden für Startnummern die gleichen Zahlennamen verwendet wie für die Kardinalzahlen (“eins”, 1, “zwei”, 2, usw.). Es können Rangplätze für die zeitliche Startfolge sein. Hat der Lauf begonnen, werden wieder Rangplätze vergeben, diesmal nicht nach Los, sondern nach der benötigten Laufzeit. Für die kürzeste Zeit wird der erste Rang vergeben (1., 1ter), für die nächstbeste Zeit der zweite Rang (2., 2ter) usw. Auf diese Weise werden die Zahlzeichen als Ordnungszahlen verwendet. Jedoch werden in beiden Fällen Zahlzeichen zum Kennzeichnen der Ordnung in einer Menge verwendet. Dies scheint manchmal nicht so klar zu sein, da im Sprachgebrauch die Ordnungszahlen nur zur Bezeichnung von Rangplätzen verwendet werden, wohingegen die gewöhnlichen Zahlennamen sowohl zur Bezeichnung von Kardinalzahlen als auch zur Bezeichnung von Rängen verwendet werden. Beim Nummerieren werden jedoch die gewöhnlichen Zahlennamen verwendet: “Hausnummer 3”, “Startnummer 7” etc. Diese Sprachpraxis hat allerdings insofern einen gewissen Sinn für sich, da das Zuordnen einer Zahl zu einem Element einer Menge M die Vergabe eines Rangplatzes ist, aber mit jeder Zuordnung ist sogleich die Anzahl der bis zu diesem Rangplatz schon nummerierten, gezählten Elemente bestimmt.

2. 1. 4 Der algebraische Zahlaspekt

Stand bis jetzt die einzelne Zahl als Anzahl, Zählzahl und Ordnungszahl im Vordergrund, so sollen im folgenden die Relationen zwischen den Zahlen betrachtet werden. Die Zahl als eine Maß- oder Anzahl repräsentiert etwas von ihr Verschiedenes, eine Größe, eine Menge oder ein Gewicht. Sie fungiert als ein darstellendes Zeichen, zur Bezeichnung der Eigenschaft eines Messobjektes. Der algebraische Aspekt kennzeichnet die syntaktische Dimension der Zahlen und umfasst im wesentlichen die Rechenoperationen als die Transformation von Zahlen nach Regeln. Die Rechenoperationen erster Stufe sind die Addition und die Subtraktion. Diese finden eine mathematische Deutung wiederum im Zuordnungs-, aber auch im Verknüpfungsbegriff.

Rechenoperation als Zuordnung

Die Addition $5 + 3 = 8$ lässt sich als Zuordnung zwischen zwei Zahlenmengen auffassen: D , der Vorbereich (Definitionsbereich), zu dem 5 gehört, und W , dem Nachbereich (Wertebereich), der 8 enthält. Der Ausdruck “+3” ist die Zuordnungsvorschrift. Die Zuordnungsvorschrift “+n” ordnet jeder natürlichen Zahl eindeutig eine zweite natürliche Zahl zu, die Addition ist also eine umkehrbar eindeutige Zuordnung. Jede Addition lässt sich umkehren, indem man die Operation sucht, die von W wieder zu D führt: $8 - 3 = 5$. Im Bereich der natürlichen Zahlen ist allerdings die Operation der Subtraktion eingeschränkt: Eine Zuordnungsvorschrift “-b” hat in den natürlichen Zahlen keinen Wert c , falls $a < b$ gilt. Der Nachbereich müsste um die (positiven und negativen) ganzen Zahlen erweitert werden.

Rechenoperationen als Verknüpfungen

Eine andere Art der Zuordnung besteht darin, beispielsweise das Paar (5;3) als Element des Definitionsbereiches der Menge von Paaren natürlicher Zahlen, + als Zuordnungsvorschrift und 8 als Element des Wertebereiches einzelner natürlicher Zahlen zu wählen.

Symbolisch dargestellt:

$$(5;3) \text{ -----} \rightarrow (+) 8$$

Die Vorschrift (+) ordnet jedem Paar natürlicher Zahlen eine dritte natürliche Zahl zu. Die Zuordnung ist allerdings nicht eindeutig umkehrbar. Es gilt neben

$$(5;3) \text{ ----} \rightarrow (+) 8 \text{ auch } (7;1) \text{ ----} \rightarrow (+) 8, (4;4) \text{ ----} \rightarrow (+) 8 \text{ und } (6;2) \text{ ----} \rightarrow (+) 8.$$

Die Zuordnung zwischen Paaren und Einzelementen heißt (zweistellige) Verknüpfung. Im Falle der Addition liegt speziell die Verknüpfung $N \times N \text{ ----} \rightarrow (+) N$ vor. Da beide Koordinaten des Paares derselben Menge entnommen sind, wird sie als innere Verknüpfung bezeichnet.

Im allgemeinen ist die Addition keine eindeutig umkehrbare Zuordnung. Im Einzelfall kann man aber versuchen, zu einer vorgegebenen natürlichen Zahl Paare zu finden, denen diese Zahl zugeordnet ist. Es werden durch Zerlegung einer Zahl zwei Summanden gesucht:

$$(x; y) \text{ ----} \rightarrow (+) 9 \text{ oder als Gleichungsform: } x + y = 9.$$

Eigenschaften der Rechenoperationen

Auch die Eigenschaften der Rechenoperationen können zur Deutung von Zahlen unter dem algebraischen Aspekt herangezogen werden. Es handelt sich um die Kommutativität, die Assoziativität und die Monotonie.

a) Kommutativität

Für alle Paare (a;b) $N \times N$ gilt: $a + b = b + a$ und $a * b = b * a$. Die Vertauschung der Summanden oder Faktoren ändert das Resultat nicht, was nicht für Subtraktion und Division gilt.

b) Assoziativität

Für alle Tripel (a, b, c) natürlicher Zahlen gilt:

$$(a + b) + c = a + (b + c) \text{ und } (a * b) * c = a * (b * c).$$

Addition und Multiplikation gelten zunächst für Paare. Möchte man eine dritte Zahl addieren oder multiplizieren, dann muss man erst zwei Zahlen zu einer Zahl verrechnen und dann mit der dritten ein Paar bilden. Welche zwei Zahlen man zuerst zu einem Paar verrechnet, hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.

c) Monotonie

Monotonie der Addition:

$$a + b = (a+x) + (b-x) \text{ oder } a + b = (a-x) + (b+x).$$

Das Resultat einer Summe $a+b$ ändert sich nicht, wenn man zu einem Summanden a eine Zahl x addiert und von b die gleiche Zahl x subtrahiert oder umgekehrt.

Monotonie der Subtraktion:

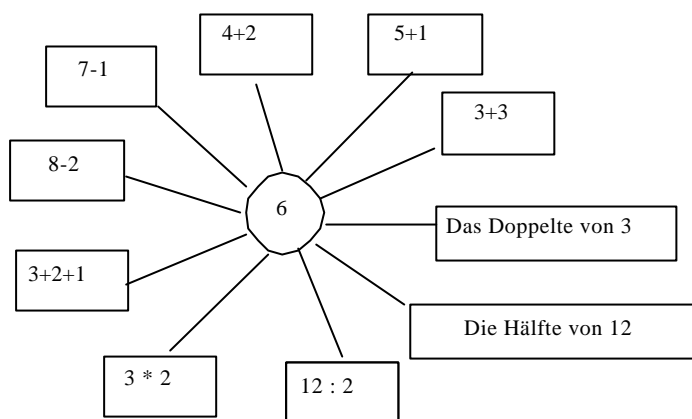
$$a - b = (a + x) - (b + x) \text{ oder } a - b = (a-x) - (b-x).$$

Das Resultat einer Subtraktion $a - b$ ändert sich nicht, wenn man zu a und b die gleiche Zahl x addiert oder von a und b die gleiche Zahl x subtrahiert.

2. 1. 4. 1 Rechenoperation und algebraischer Zahlaspekt

Unter dem algebraischen Zahlaspekt wird die Zahl syntaktisch gedeutet, denn jede Zahl wird primär als Resultat von Rechenoperationen mit anderen Zahlen aufgefasst.

Am Beispiel der Zahl 6 kann das so aussehen:



Kommutativität und Monotonie erlauben weitere syntaktische Relationen festzustellen:

$$6 = 5 + 1 \text{ ----> } 6 = 1 + 5 \text{ (Kommutativität der Addition)}$$

$$6 = 3 * 2 \text{ ----> } 6 = 2 * 3 \text{ (Kommutativität der Multiplikation)}$$

$$6 = 3 + 3 \text{ ----> } 6 = 2 + 4 \text{ (Monotonie der Addition)}$$

$$6 = 8 - 2 \text{ ----> } 6 = 10 - 4 \text{ (Monotonie der Subtraktion)}$$

Eine Zahl ist also ein Knoten in einem Netz der Zahlen, mit denen sie über Rechenoperationen verbunden ist. Die Rechenoperationen haben wahrnehmungs- und handlungsmäßige Grundlagen, die die unterschiedlichen Zahlaspekte verdeutlichen:

Unter dem kardinalen Zahlaspekt ist die Addition die Vereinigung zweier elementfremder Mengen. Zu einer Menge A werden die Objekte der Menge B hinzugefügt. Entsprechend werden bei der Subtraktion aus der Menge A die Objekte einer Menge B weggenommen, so dass A als Rest erscheint.

Unter dem Operatoraspekt kann man beispielsweise bei der "Länge" die Addition als Zusammenfügen einer Einheitslänge deuten. Die Addition $a + b = c$ lässt sich dann durch Zusammenfügen der a-fachen und der b-fachen Einheitslänge verstehen:

$$a * e + b * e = (a + b) * e = c * e. \text{ Die Subtraktion wäre } c * e - b * e = (c - b) * e = a * e.$$

Unter dem konstruktiven Zahlaspekt lassen sich Rechenoperationen am Zahlenstrahl verdeutlichen, der gewissermaßen Einheitsbewegungen im Sinne von Vorwärtsbewegen oder Rückwärtsbewegen erlaubt. Für die Addition $5 + 3 = 8$ würde man sich von 5 aus 3 Punkte vorwärtsbewegen und sich für die Subtraktion entsprechend von 8 aus 3 Punkte zurückbewegen.

2. 1. 5 Der ordinale Zahlaspekt

Auch beim ordinalen Zahlenaspekt stehen die Beziehungen zwischen Zahlen im Mittelpunkt der Betrachtung. Das beziehungsstiftende Moment ist allerdings nicht die Rechenoperation, sondern die Ordnung der natürlichen Zahlen. Diese wird über die Ordnungsrelationen “kleiner als”, “zwischen” und “ist Vorgänger” und “ist Nachfolger” vermittelt.

2. 1. 5. 1 Ordnungsrelationen

a) Ordnungsrelation “kleiner als”

Die Relation “kleiner als” ($<$) in der Menge der natürlichen Zahlen ist irreflexiv, weil für keine natürliche Zahl a gilt: $a < a$. Sie ist asymmetrisch, denn zwischen zwei unterschiedlichen Zahlen a und b gilt: $a < b \neq b < a$. Sie ist transitiv, denn für drei Zahlen $a, b, c \in \mathbb{N}$ gilt: Wenn $a < b$ und $b < c$, dann $a < c$. Sie heißt strenge Ordnungsrelation, welche linear ist, denn für zwei ungleiche Zahlen $a, b \in \mathbb{N}$ gilt: entweder $a < b$ oder $b < a$. Schließlich ist sie eine Wohlordnungsrelation, weil jede Teilmenge von \mathbb{N} bezüglich der Relation $<$ ein kleinstes Element besitzt. Wird von einer strengen Wohlordnungsrelation gesprochen, so werden alle genannten Eigenschaften zusammengefasst.

Besteht für zwei Zahlen $a, b \in \mathbb{N}$ die Beziehung $a < b$ so besteht gleichzeitig die Beziehung $b > a$, was über die Linearität der Relation $<$ vermittelt ist.

Die strenge Wohlordnungsrelation kann abgeschwächt werden, wenn für zwei Zahlen $a, b \in \mathbb{N}$ eine Relation mit der Aussageform “ $x < y$ ” oder “ $x = y$ ”, kurz “ $x \leq y$ ” definiert ist. Diese Relation ist im Gegensatz zur Relation $x < y$ reflexiv, denn es gilt für alle $a \in \mathbb{N}$ die Aussage $a \leq a$. Sie ist identitiv, denn aus $a \leq b$ und $b \leq a$ würde $a = b$ folgen. Sie ist konnex (Konnexität), da gilt: $a \leq b$ oder $b \leq a$. Sie ist symmetrisch, denn es gilt: $x \leq y$ schließt $y \leq x$ nicht aus; sie also auch nicht linear, da sich nicht generell alle Zahlenpaare zu einer Kette verknüpfen lassen. Allerdings können die Zahlen in Form eines bestimmten Netzes, des Hasse-Diagrammes, dargestellt werden, wenn statt der Relation die Relation u (zu lesen: unter) verwendet wird. Die Relation “ \leq ” wird auch als Halbordnung oder schwache Ordnung bezeichnet.

b) Ordnungsrelation “zwischen”

Die Relation “zwischen” ergibt sich aus dem Vergleich von mindestens drei Zahlen, was durch Konjunktion zweier Elementaraussagen dargestellt werden kann. Werden drei natürliche Zahlen a, b und c verglichen, und ist $b < a$ und $a < c$, so ist die Aussage wahr: “ a liegt zwischen b und c ”. Die Relation “zwischen” ist also dreistellig. Aus der Aussage “ a zwischen b und c ” folgt aber nicht, dass a Nachfolger von b und Vorgänger von c ist. Diese Aussage ist auch wahr für alle Zahlen, die kleiner als a und größer als b und größer als a und kleiner als c sind.

c) Relationen “ist Vorgänger” und “ist Nachfolger”

Jede natürliche Zahl n hat einen Nachfolger $n' = n+1$. Zwischen n' und n besteht die Relation “ist Nachfolger von”. Gilt für eine Zahl m , dass n ihr Nachfolger ist, gilt also $m' = n$ oder $m+1 = n$, so wird m Vorgänger von n genannt. Zwischen m und n besteht die Relation “ist Vorgänger von”.

d) Ordinaler Zahlaspekt

Jede natürliche Zahl kann über Ordnungsbeziehungen mit allen übrigen Zahlen daraufhin beurteilt werden, ob bestimmte Relationen darstellende Aussageformen durch Einsetzen von Zahlen als Konstante oder Argumente in Variable, zu einem wahren Aussagesatz werden. Über die Zahl 6 können z.B. die folgenden Aussagesätze geäußert werden, die sämtlich wahr sind: "6 ist Nachfolger von 5"; "6 ist Vorgänger von 7"; " $6 > 4$ "; " $6 \leq 9$ "; "6 liegt zwischen 1 und 10".

2. 1. 5. 2 Zusammenhang des ordinalen mit anderen Zahlaspekten

a) Darstellung der Ordnung mit Hilfe von Mengen

Soll entschieden werden, ob für zwei verschiedene Zahlen a und b $a < b$ oder $b < a$ gilt, so bildet man für a und b die Mengenrepräsentanten A und B . Man bildet Paare aus A und B . Stellt sich heraus, dass Elemente von B übrigbleiben, dann gilt $a < b$ oder $b > a$. A ist dann äquivalent zu einer echten Teilmenge von B . Muss man zu A nur ein Element hinzufügen, so ist die Anzahl von A Vorgänger der Anzahl von B oder die Anzahl von B Nachfolger von A . Entsprechende Überlegungen kann man anstellen, wenn $a > b$ gilt. Die Kleinerbeziehung lässt sich auch mit Hilfe des algebraischen Zahlaspektes, der Addition und der Subtraktion, definieren.

b) Darstellung der Ordnung mithilfe von Quantitäten

Betrachtet man Längen als Beispiel von Quantitäten und faßt die natürlichen Zahlen als Operatoren auf, die eine als Einheit vorgegebene Länge vervielfachen, so spiegelt die größenmäßige Anordnung der Längen die Ordnung der Zahlen wieder und umgekehrt. Anhand der Längenrepräsentanten, z.B. Stäbchen, lässt sich durch den Vergleich derer Längen unmittelbar auf die Ordnung der Zahlen rückschließen. Man sieht das einheitsweise Größerwerden der Stäbchen sowie die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehung und kann die transitiven Beziehungen zwischen drei Stäbchen sehen.

c) Die Zählreihe als Ausdruck der Zahlenordnung

Im Falle der Quantitäten waren die Zahlen räumlich repräsentiert, im Falle der Zählreihe werden die Zahlen durch die sukzessive Nennung ihrer Namen zeitlich geordnet. Befindet sich beispielsweise die Zahl a in der Zählfolge hinter b , so ist a größer als b . Die zeitliche Zählfolge wiederum kann geometrisch durch den Zahlenstrahl repräsentiert werden, auf dem die Zahlzeichen von links nach rechts angeordnet sind. Liegt a rechts von b , so ist a größer als b .

2. 1. 6 Zusammenfassung

Die natürlichen Zahlen weisen unterschiedliche Aspekte auf. Der kardinale Aspekt faßt jede natürliche Zahl n als Anzahl auf, d. h. als Eigenschaft einer Klasse äquivalenter Mengen. Unter dem Operatoraspekt wurde die Zahl n als eine Vorschrift gedeutet, die Elementen einer Quantität das n -fache einer Einheit dieser Quantität umkehrbar eindeutig zuordnet. Sie drückt das zwischen Größen bestehende Maßverhältnis aus. Unter dem konstruktiven Aspekt werden die natürlichen Zahlen als Elemente einer Zählreihe aufgefasst, deren Eigenschaften axiomatisch beschrieben werden können und die sich zum Auszählen von Mengen und zum Ordnen von Elementen nach Rängen verwenden lassen. Diese Aspekte kann man mit Maier (1990) als fundamentale Zahlaspekte betrachten, da sich deren Verständnis aus dem Kontakt mit der physischen Realität ergibt. Zahlen erscheinen deswegen

natürlich, weil sie als Eigenschaften der physischen Realität erlebbar sind. Verwendet man den algebraischen und ordinalen Zahlaspekt im engsten Sinne, werden die Zahlen als begrifflich konstituierte Objekte vorausgesetzt. Diese begriffliche Konstitution wird über Struktureigenschaften vermittelt, die den kardinalen, den Operator- und den konstruktiven Zahlaspekt kennzeichnen. Sicherlich haben kleine Kinder kein Konzept davon, dass und wie sich Zahlen im Zusammenhang von Rechenoperationen deuten lassen oder dass das Ordnen von Quantitäten einer strukturellen Eigenschaft der Zahlen entspricht. Allerdings verstehen Kinder schon, manche behaupten sogar, Säuglinge (z.B. Wynn, 1995), dass sich eine Menge ändert, wenn man ein Element hinzufügt oder eines wegnimmt, wobei dieses Verständnis zunächst auf kleine Mengen beschränkt und nicht generalisiert wird (Cooper, 1984). Auch die "kleiner als" Relation wird schon vor der expliziten Ausbildung des Zahlkonzeptes verstanden, wie Untersuchungen zur Seriation oder Mengeninvarianz zeigen (z.B. Wartenberg, 1994).

2. 2 Die Zählprinzipien nach Gallistel & Gelman

Bei der Diskussion numerischer Kompetenzen werden die von Gallistel & Gelman (1978) formulierten Zählprinzipien oft als Erklärung für Zählen verwendet. Diese Prinzipien basieren auf dem kardinalen und dem konstruktiven Zahlaspekt, wobei der konstruktive Zahlaspekt in der Literatur meist mit dem ordinalen Zahlaspekt gleichgesetzt wird. Ist dort vom ordinalen Zahlaspekt die Rede, dann steht nicht die "kleiner als"-Relation im Vordergrund, sondern die Tatsache, dass die Zahlzeichen in stabiler Weise geordnet sind und sich somit zum Abzählen eignen. Im folgenden wird durch den Ausdruck "Ordinalität im strengen Sinne" der ordinale Zahlenaspekt gemeint und durch "Ordinalität im weiteren Sinne" der konstruktive Zahlenaspekt mit abgedeckt. Kardinalität nach Gelman & Gallistel wird durch die Zahl als Repräsentation der Anzahl gekennzeichnet und Ordinalität im weiteren Sinne bezieht sich auf die stabile Ordnung der Zahlzeichen.

Gelman & Gallistel (1978) betonen, dass die Anwendung von Zahlwörtern keineswegs notwendig für das Zählen ist. Notwendig sei nur die Verwendung von Marken, die sich eindeutig von einander unterscheiden lassen ("unique tags") und in einer festen Reihenfolge ("fixed order") verwendet werden. Die Marken sollen einen arbiträren Status haben und nicht Namen oder Beschreibungen der zu zählenden Objekte sein. Die Zahlwörter genügen zwar diesen Kriterien, aber auch andere Klassen von Zeichen, z.B. die Buchstaben des Alphabetes, können als Zahlzeichen verwendet werden. Die Zahlzeichen müssen nicht einmal verbaler Natur sein, "Fächer" im Kurzzeitgedächtnis erfüllen ebenfalls diese Funktion. Aus diesem Grunde schlagen Gelman & Gallistel eine neue Terminologie vor, um die Kategorie möglicher Zählmarken von der Unterklasse derjenigen Zählmarken zu unterscheiden, welche die traditionellen Numeralia konstituieren. Die allgemeine Kategorie nennen sie Numerons, die Numeralia Numerlogs. "Numerons are any distinct and arbitrary tags that a mind (human or nonhuman) uses in enumerating a set of objects. Numerlogs are the count words of a language." (1978, S. 77). Sie lassen die Möglichkeit offen, dass auch Tiere genauso wie Säuglinge und Kleinkinder über Numerons verfügen, womit sie die Existenz nonverbalen Zählens postulieren. "That is, they may tick off items in an array, one by one, with distinct mental tags employed in a fixed order, and use the final mental tag as a representation of numerosity. This is nonverbal counting. Our terminology also allows for the possibility that young children use

nonconventional or idiosyncratic tag sequences when counting, as indeed they sometimes do.” (1978, S.77).

Zur Annahme einer nonverbalen Zählprozedur, der erst in späteren Publikationen (z.B. Gelman & Gallistel, 1992) ein Akkumulatormechanismus zugrunde gelegt wird (vgl. Kap. 3), kommt die Annahme diskreter mentaler Zustände dazu, die wie distinkte Marken (“distinct tags”) funktionieren können, die in einer fixen Abfolge verwendet werden. Ihre semantische Rolle besteht in der Repräsentation der Mächtigkeit einer Menge. Es soll also ein mentales Äquivalent der aus Numeralia (numerlogs) aufgebauten Zählreihe geben, welches wesentliche semantische und syntaktische Eigenschaften der Zählreihe hat. Auf diese repräsentationalistische Annahme wird insbesondere in Kap. 4 kritisch eingegangen.

Da das Zählen nicht von den Numeralia ausgehend definiert werden soll, muss eine allgemeinere Definition des Zählens erfolgen. Gelman & Gallistel schlagen fünf Prinzipien vor, von denen die ersten drei angeben, wie man zählt (prozedurale Regeln), das vierte Prinzip definiert, was überhaupt alles zählbar sein soll, und das fünfte Prinzip beschreibt eine allgemeine Eigenschaft einer zu zählenden Kollektion, die sich aus den anderen vier Prinzipien ergibt.

1. *Das Eins-zu-Eins-Prinzip*

Die zu zählenden Gegenstände müssen eindeutig durch Zählzeichen, z.B. Marken, gekennzeichnet werden. Zwischen der zugewiesenen Marke und dem Objekt muss eine umkehrbar eindeutige Relation bestehen. Wird ein Objekt ausgelassen, eine Marke nicht vergeben oder bekommt ein Objekt zwei Marken, dann wird gegen dieses Prinzip verstoßen, so dass die genaue Anzahl der zu zählenden Menge nicht festgestellt werden kann. Die Anzahl bezeichnen Gelman & Gallistel (1978) als Numerosität (numerosity). Beim Zählen sind zwei Prozesse zu koordinieren: das Partitionieren und das Markieren. Das Partitionieren besteht darin, dass durch das Zählen schrittweise die zu zählenden Gegenstände in eine gezählte und eine zu zählende Teilmenge zerlegt werden und das Markieren besteht in der schrittweisen Erzeugung von Marken, die von den bereits erzeugten verschieden sind.

2. *Das Prinzip der stabilen Abfolge*

Dieses Prinzip bezieht sich auf den Umstand, dass man zum Zählen über eine stabil geordnete Sequenz von Zählmarken verfügen muss, die sich voneinander in eindeutiger Weise unterscheiden und deren Reihenfolge sich nicht ändert. Die Kennzeichnung dieses Prinzips als ordinales (ordinality) ist missverständlich, da die Art der Ordnung der Zahlzeichen nicht expliziert wird, zumindest nicht in der 1978er Abhandlung. Aus der fixen Anordnung der Marken folgt keineswegs die größer-kleiner-Relation, was der Vergleich mit der lexikalischen Ordnung zeigt: Aus der Tatsache, dass A vor B steht folgt nichts über deren Größenrelation, genauso wenig kann durch die Verknüpfung von A mit “+1” B als Nachfolger von A erzeugt werden. Die einzige Quantifikation, die mit einer fixen Anordnung von Marken möglich ist, besteht in der Prüfung der Mächtigkeitsäquivalenz, der Gleichheit oder Ungleichheit, des Mehr oder Weniger, wodurch die Zählkompetenz auf die relative Mengenbeurteilung (“relative numerosness judgment”, Davis & Pérusse, 1988) beschränkt bleibt.

3. *Das Kardinalitätsprinzip*

Die zuletzt produzierte (Zähl-)Marke repräsentiert eine Eigenschaft der abgezählten Menge, ihre Anzahl bzw. Numerosität, die Kardinalzahl der Menge. Auch dieses Prinzip legt die Vermutung nahe, dass Gelman & Gallistel (1978) bei der Formulierung ihrer Prinzipien sich implizit an der Struktur der natürlichen Zahlen orientierten, wie sie beispielsweise von Peano axiomatisiert worden ist. Allerdings stellen sie keine Verbindung zwischen den beiden ersten beiden Prinzipien und dem Kardinalitätsprinzip her, sondern sie umschreiben mit diesen Prinzipien nur das intuitive Zählverständnis und die naive Zählpraxis, ohne diese Prinzipien mathematisch abzuleiten oder zu begründen. Auch das Kardinalitätsprinzip erlaubt keine zählende Quantifizierung, die über die Prüfung von Mächtigkeitsäquivalenzen hinaus geht, da eine quantitativ interpretierbare Nachfolgerrelation wie $+1$ fehlt und da die kleiner- bzw. größer-Relation nicht erklärt ist. Die Marken sind nach wie vor eine lexikalische Ordnung wie z.B. das Alphabet. Wenn beispielsweise die Marken von A bis N in lexikalischer Ordnung vergeben werden, dann kann man an der Marke N nicht ablesen, wie viele Objekte markiert worden sind, es sei denn, man nummeriert die Buchstabenmarken, was aber die Einführung des ordinalen Zahlaspektes im engeren Sinne bzw. die mathematische Begründung des Zählens voraussetzen würde. Mit diesen drei Prinzipien kommt man ohne ein konzeptuelles Zahlensystem nicht über relative Mächtigkeitsurteile hinaus.

4. *Das Abstraktionsprinzip*

Das Abstraktionsprinzip ist die Feststellung, dass die Prinzipien eins bis drei auf jede beliebige Kollektion von Entitäten anwendbar sind. Dies setzt die Fähigkeit zur Klassifikation auch heterogener Items zum Zwecke des Zählens voraus, wobei diese Fähigkeit, so Gallistel & Gelman (1978), indikativ wäre für eine Generalisierung des Objektbegriffes.

Jemandem, der die Zählprinzipien nur auf kleine Mengen korrekt anwenden kann, würde man nur eine eingeschränkte Zählkompetenz attribuieren können. Im Bereich der Tierforschung wird dies über den Lerntransfer geprüft, der auch in der Säuglings- und Kleinkindforschung herangezogen werden kann, um die Generalisierbarkeit des Zählens über Objektarten oder Darbietungsmodalitäten hinweg festzustellen.

5. *Das Abfolgeirrelevanzprinzip*

Dieses besagt, dass die Reihenfolge, in der die Items markiert werden und welches Item mit welcher Marke versehen wird, irrelevant ist.

An dieser Stelle sei etwas bemerkt zum Problem, wie Numerons als mentale Repräsentate von Zählmarken identifiziert werden sollen. Das Problem wird besonders akut, wenn es darum geht, die Zählkompetenz von nicht sprachfähigen Lebewesen wie Tiere oder noch nicht sprechenden wie humane Säuglinge, zu erforschen. Das Zuordnen von Zahlzeichen zu Objekten lässt sich eindeutig durch die Verwendung von Numeralia oder motorische Indikatoren wie Zeigen, Anfassen oder Weglegen identifizieren. Solche Indikatoren konnten allerdings nur bei Menschen festgestellt werden (vgl. Davis & Pérusse, 1988). Fehlen diese, müssen Hinweise auf das Verwenden von mentalen Zahlzeichen (numerons) über indirekte Verhaltensweisen ermittelt werden, z.B. Diskriminationsleistungen.

Eine weitere Bemerkung betrifft die Art und Weise, wie Gelman & Gallistel Ordinalität und Kardinalität definieren. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass Ordinalität sich nicht auf die “kleiner als” oder “mehr-weniger” Relation bezieht, sondern auf die fixe Abfolge der Numerons, dass also Ordinalität im Sinne z.B. der lexikalischen Ordnung gemeint ist: A kommt vor B, B kommt vor C usw. Auch Davies & Pérusse (1988) weisen darauf hin, dass so verstandene Ordinalität weder ein Nebenprodukt des Zählens noch eine notwendige Voraussetzung dafür ist. Mehr oder weniger Objekte/ Ereignisse können wahrnehmungsmäßig unterschieden werden, wobei das verbale Zählen die diskriminativen Möglichkeiten erheblich erweitert.

Der ordinale Größenvergleich durch Wahrnehmung ist ebenfalls als vom Zählen unabhängige Kompetenz zu verstehen. Verhaltensweisen, die sich durch die Anwendung der Transitivitätsregel charakterisieren lassen, indizieren das paarweise Ordnen von Größen, so dass eine auf- bzw. absteigende Reihe von Größen möglich wird. Ist eine kleinere Gruppe von Stäbchen ihrer Länge nach angeordnet, so sieht man, dass A kleiner als B ist, A links von B liegt, B kleiner als C ist, B links von C liegt und folglich sieht man auch, dass A kleiner als C ist. Dieser “ordered overview” (Gillan, 1981) ist keineswegs indikativ für das Vorliegen des logischen Konzepts der Transitivität. Piaget (1964) schrieb dieses 4jährigen Kindern nur dann zu, wenn diese Stäbchen paarweise verglichen und somit zur Lösung der Transitivitätsaufgabe einen operationalen Lösungsweg beschreiten mussten. Nach einigen Modifikationen der Transitivitätsaufgabe durch die Kritiker Piagets (z.B. Brainerd, 1974; Bryant & Trabasso, 1971; Trabasso, 1977) schrieben diese auch jüngeren Kindern das operationale logische Konzept der Transitivität zu. Diese Modifikationen hatten gemeinsam, dass die Kinder alle zu vergleichende Stäbchen simultan sahen, deren Länge stets von links nach rechts zunahm. Zwar wurden dann Paare von Stäbchen außerhalb der Serie näher zum Kind hin präsentiert, diese aber am Ende zurück in die Serie gelegt. Der Schluss $A < C$ muss folglich nicht notwendigerweise operational sein, es kann auch das präoperationale, perzeptiv Wissen über räumliche und zeitliche Kontingenzen genügen (vgl. Chapman & Lindenberger, 1992a, 1992b; Markovits, Dumas, & Malfait, 1995). Ordinale und transitive Größenvergleiche in der Wahrnehmung sind nicht notwendig an das Zählen gebunden, aber das Verständnis des ordinalen Zahlenaspekts wurzelt in ihnen.

Schließlich lassen Gelman & Gallistel (1978) den Zusammenhang zwischen der Kardinalität anzeigenden Funktion einer Zählmarke und der stabilen Abfolge der Zählzeichen unbestimmt. Die stabile Abfolge der Zählzeichen bezeichnen sie zwar als Ordinalität, aber sie führen nicht explizit die “kleiner als” - Relation ein. Sicherlich ist eine konstante Folge von Zählzeichen zur Bestimmung der Mächtigkeit einer Menge notwendig, denn würde von Zählhandlung zu Zählhandlung die Abfolge der Zählzeichen wechseln, würde der Mächtigkeit M jedesmal ein anderes Zählzeichen entsprechen. Die Konstanz der Abfolge der Zählzeichen allein garantiert keineswegs eine numerische Bestimmung der Mächtigkeit einer Menge. Die konstante Zählzeichenfolge kann auch als Hilfsmenge verwendet werden, mit der die numerische Äquivalenz der Zählzeichenmenge *Zählreihe* (ZR) und einer Menge M festgestellt wird. Eine Antwort auf die Frage, wie viele Elemente M enthält, kann so gegeben werden: M enthält genauso viele Elemente wie ZR oder weniger oder mehr als ZR . Über die Feststellung der Gleichheit oder Ungleichheit der Mächtigkeit von Mengen kommt man nicht hinaus. In diesem Zusammenhang wird gerne das Beispiel des Schäfers angeführt, der nicht zählen kann, aber abends, wenn er seine Schafe zurück in den Pferch bringt, feststellen will, ob auch alle Schafe da sind (Ifrah, 1991). Zu diesem Zwecke nimmt er ein Säckchen, in dem sich so viele Steinchen befinden wie

er Schafe hat, lässt die Schafe einzeln in den Pferch und legt jedesmal ein Steinchen aus dem Säckchen auf ein Häufchen. Ist kein Steinchen mehr übrig, dann weiß er, dass alle Schafe wieder zurück sind.

Die verwendete Abfolge von Zählzeichen hat die Eigenschaft, dass sich einzelne Zählzeichen nur in ihrem Rangplatz, d. h. in ihrer Position in der Reihe unterscheiden. Die Zählzeichen sind also Platznummern und implizieren keine größenmäßige Ordnungsrelationen. Da zur Bestimmung der Kardinalität einer Menge M über die Bestimmung der Äquivalenz hinausgegangen werden kann, muß jedem Zahlzeichen nicht nur eine Nummer, sondern eine Mächtigkeit zugeordnet werden, wobei der Unterschiedlichkeit der Zahlzeichen eindeutig die Unterschiedlichkeit der Mächtigkeiten entsprechen muss. Alle Mächtigkeiten sind dann ordinal über Reflexivität, Inklusivität und Exklusivität mit einander verbunden, wenn man die Relation "enthält" heranzieht: Jede Mächtigkeit M enthält sich selbst (Reflexivität): $M \subseteq M$, $M \neq \emptyset$. Jede Mächtigkeit M enthält die Mächtigkeiten N_i , $N_i \neq \emptyset$, $M \neq N_i$ ($i=1, \dots, n$): $N_i \subset M$, ausgenommen die Mächtigkeit 1, die nur sich selbst enthält. Jede Mächtigkeit M ist nicht nur in sich selbst enthalten, sondern auch in Mengen O_i , $O_i \neq \emptyset$, $M \neq O_i$ ($i=1, \dots, n$): $M \subset O_i$. Zusammengefasst bedeutet dies, dass jede Menge M nicht nur Untermengen enthält, sondern auch Untermenge zu Obermengen ist. Der ordinale Zahlaspekt ist also notwendig mit dem kardinalen Zahlaspekt verbunden: Die Zählreihe muß nicht nur konstant angeordnet sein, sondern ebenfalls den ordinalen Zahlaspekt widerspiegeln. Zeichen, die zum Zählen herangezogen werden können, enthalten nicht intrinsisch die Ordnungsrelation. Entsprechend haben alle Kulturen Zählreihen entwickelt, die aus unterschiedlichen Zählzeichen bestehen, wie Wörter, Körperteile oder Fingermuster (vgl. Ifrah, 1991; Menninger, 1979; Saxe, 1982). Die Verwendung identischer Zählmarken würde bedeuten, dass man beispielsweise "da da da da..." oder "eins eins eins eins" zählte. Die letztverwendete Zählmarke würde nicht indizieren, wie viele Entitäten erfasst worden sind, sondern nur der Prüfung der Mächtigkeitsäquivalenz dienen. Zählen erfordert also das Erlernen einer Sequenz unterschiedlicher Marken, deren jede letztverwendete Kardinalität anzeigen soll.

Überträgt man diese Überlegungen auf Numerons als mentale Zählzeichen, ist schwerlich anzunehmen, dass die Numerons gemäß der Ordnungsrelation angeordnet sind. Zwar werden wahrnehmungsmäßig größer und kleiner unterschieden, aber ob im mentalen System Zahlzeichen mit ordinaler Semantik vorhanden sind, ist offen. Gelman und Gallistel scheinen in einer späteren Publikation (Gelman & Gallistel, 1992) dieses Problem der Zusammengehörigkeit von ordinalem und kardinalen Zahlenaspekt bemerkt zu haben. Sie postulieren eine analoge mentale Struktur, die isomorph zu arithmetischen Strukturen ist, eine Art "histogrammic calculator". Dies würde implizieren, dass Aspekte des operativen Zahlbegriffs in die psychische Struktur eingebaut sind.

2. 3 Die psychische Realisierung der Zahlaspekte nach Fuson

Fuson (1988a,b; 1992) entwickelte auf der Basis von Untersuchungen mit Kleinkindern Vorschläge, wie Terme im Zusammenhang mit der Erforschung numerischer Kompetenzen verwendet werden sollten. Ihre Vorschläge werden hier aufgeführt, da sie Differenzierungen im Bereich der Domäne Zahl vornehmen, die in engem Zusammenhang mit den erörterten Zahlaspekten stehen. Sie unterscheidet sieben Situationen, in denen Kinder zwischen 2 bis 8 Jahren Zahlworte verwenden (vgl. Tab. 1-2). Innerhalb des kardinalen Verständniskontextes beziehen sich die Zahlworte auf die

Mächtigkeit einer Menge diskreter Elemente, innerhalb des ordinalen Verständniskontextes auf eine geordnete Menge, wobei die relative Position des bezeichneten Elementes (Rangplatz) angegeben wird. Bei der Ermittlung eines Maßes beziehen sich die Zahlwörter auf eine kontinuierliche Quantität, von der ausgesagt werden kann, wieviele Einheiten die betrachtete Quantität ausmachen. Allerdings kann auch die Kardinalität einer Menge als diskretes Maß aufgefasst werden. Die Aspekte der Sequenz (i.S.v. Numeralsequenz) und des Zählens (i.S. des eineindeutigen Zuordnens von Numeralia zu Objekten) sind nach Fuson (1992) kulturelle Werkzeuge, um sicherzustellen, dass in der kardinalen, der ordinalen und der Situation des Messens jeweils die richtigen Zahlwörter verwendet werden. Die Zahlwortreihe ist eine nur zu rezitierende feste Anordnung von Zahlwörtern, die sich zunächst genauso wie die Elemente des Alphabetes auf nichts Bestimmtes beziehen. Das Zählen ist das eineindeutige Versehen von je einem Objekt mit je einer Zählmarke, d. h. die Zählmarke besitzt keinen numerisch-semantischen Gehalt außer demjenigen, eine eindeutige Unterscheidung zu ermöglichen. Eng damit zusammen hängt der symbolische, numerale Kontext, in dem ein Zahlwort ebenfalls zunächst keine Bedeutung hat, sondern in dem die Verwendungssynonymität von Zahlzeichen definiert wird, z.B. dass das geschriebene Zahlwort "sechs" der geschriebenen Ziffer "6" bedeutungsgleich ist. Allerdings nehmen diese Numeralia dann die diversen Zahlbedeutungen (kardinale, ordinale, Maß, Sequenz, Abzählen) an. Schließlich können Zahlzeichen (Numeralia) auch in non-numerischen Kontexten Verwendung finden, z.B. Telefonnummern, Fernsehkanäle, Hausnummern oder Postleitzahlen.

Tab.1-2 Situationen, in denen Kinder Zahlwörter gebrauchen (nach Fuson, 1988a)

Verwendete Zahlwörter	Objekt-situation	Objekte geordnet?	Einheiten vorhanden?	Referent	beschreibt	Äquivalenzrelation	Ordnungsrelation	Operation ^a
kardinal	diskrete Entitäten	nein	perzeptive Einheiten ^b	Menge der Entitäten	wieviel in der Menge sind	gleiche Anzahl	mehr als, weniger als	+, - (ganze Zahlen)
ordinal	diskrete Entitäten	ja	perzeptive Einheiten ^b	Element einer Menge	relative Position des Objektes ^c	gleiche relative Position ^d	davor, dahinter in der Abfolge ^d	+, - (Ordinalzahlen)
Maß	kontinuierliche Quantität	nein	Einheit dieser Quantität	kontinuierliche Quantität	wieoft die Einheit in der Quantität ist	gleiche Menge	mehr als, weniger als	+, - (ganze Zahlen, rationale Zahlen)
Sequenz	keines	ja	unterschiedliche Elemente	keinen	nichts	gleiches Wort	vorher, nachher	Worte der Sequenz, denen ganze Zahlen für +, - zugeordnet werden
Zählen	diskrete Entitäten ^e	nein ^f	perzeptive Einheiten ^g	jede Entität	nichts	keine ^h	keine ^h	keine
Symbolisch (numeral)	Symbol	nein	nein	das Symbol; kann auch in den anderen Situationen verwendet werden	das Symbol, egal, für was es gebraucht wird ⁱ	nur wenn als Kardinalzahl oder Maßzahl interpretiert	nur wenn als Kardinalzahl oder Maßzahl interpretiert	nur wenn als Kardinalzahl oder Maßzahl interpretiert
Non-numerische Bezeichnung	eine einzige Entität	nein ^j	nein	diese Einheit	verschiedene Attribute	keine ^j	keine ^j	keine ^j

a) Nur die einfachsten Operationen, Addition und Subtraktion, werden betrachtet

b) Perzeptive Einheiten sind die ersten Einheiten, die in dieser Situation verwendet werden; später können auch andere Einheiten Verwendung finden

c) Ein ordinales Zahlwort beschreibt die Position einer Entität bezogen auf die anderen Entitäten der Menge; diese relative Position ist von der Anordnung der Menge abgeleitet

d) Die genauen Worte, die zur Beschreibung der Relation verwendet werden, hängen von der Art der Anordnung der Entitäten ab

e) Dies können auch die Einheiten sein, die bei einem Messvorgang Verwendung finden

f) Während des Zählvorganges muss die zählende Person die Entitäten ordnen, aber diese Anordnung entfaltet sich über die Zeit hinweg und kann mit Abschluss des Zählvorganges unter Umständen nicht mehr rekonstruiert werden

g) Es könnte eine Vorstufe des Zählens geben, auf welcher Objekte nicht als perzeptive Einheiten aufgefasst werden, sondern auf welcher die Zahlwörter auf eine allgemeine, unspezifische Weise auf die Objekte bezogen werden

h) Äquivalenz- und Ordnungsrelationen könnten basierend auf der Anordnung der Objekte, hergestellt werden, was aber selten vorkommt. Vielmehr werden die Relationen genutzt, wie sie in den Kardinalzahl-, Ordinalzahl-, Maßzahl- oder Reihenzahlwörtern zum Ausdruck kommen

i) Wird das Symbol beispielsweise in kardinaler Hinsicht verwendet, beschreibt das Symbol das Wieviel der Menge

j) Anordnungen, Relationen oder Operationen existieren, was aber für den nonnumerischen Gebrauch nicht wesentlich ist

Kleine Kinder erfahren die diversen Verwendungsweisen der Zahlwörter und beginnen, diese in unterschiedlichen Kontexten anzuwenden. Die einzelnen Bedeutungs-aspekte der Zahlen kennen die Kinder nicht, erst im Laufe der Entwicklung werden diese erworben und integriert. Fuson (1988a,b; 1992) geht davon aus, dass die Kinder erst mit 8 Jahren die unterschiedlichen Aspekte der Zahl verstehen, was sich beispielsweise an der differenzierteren Verwendung der Numeralia feststellen lässt. Die kardinale, ordinale, Maßzahl und Sequenz als Gebrauchsbedeutungen der Zahlwörter, lassen sich mit Hilfe der Äquivalenz- oder Ordnungsrelation ($=$, $<$) miteinander in Beziehung setzen, woraus sich sechs unterschiedliche Referenten des Ausdrucks "Ordinalität" ableiten lassen. Fuson (1988a) schlägt vor, den Ausdruck "Ordinalität" durch die folgenden sechs spezifischeren Ausdrücke zu ersetzen:

- (1) Situation des Ordinalzahlgebrauchs ('ordinal number situation'): Es werden ordinale Numeralia wie "erster", "zweiter", "dritter" angewendet, um den relativen Platz eines Objektes in einer linear geordneten Menge anzugeben (Rang).
- (2) Situation des Gebrauchs einer Sequenz ('sequence situation'): Es wird eine Sequenz produziert, deren Elemente linear geordnet sind, z.B. die Monate, die Zahlennamen, das Alphabet.

Ordnungsrelationen ('order relations'): Zum Vergleich zweier Mengen werden " $<$ " und " $>$ " angewendet. Fuson unterteilt diese Anwendung in die vier weiteren Situationen:

- (3) Situation des kardinalen Gebrauchs ('cardinal situations'): acht ist mehr als vier.
- (4) Situation des ordinalen Gebrauchs ('ordinal situation'): der achte kommt später als der fünfte.
- (5) Situation der Anwendung von Maßzahlen ('measure situations'): mit acht Jahren ist man älter als mit fünf Jahren
- (6) Situation der Platzbestimmung in einer Sequenz ('sequence situations'): 'acht' kommt in der Zählreihe nach 'fünf'; in der Abfolge der Monatsnamen kommt 'August' nach 'Mai'.

Mit dieser terminologischen Klärung analysiert Fuson das Zählen kleiner Kinder anhand der Unterscheidung des Zählvorganges nach folgenden Merkmalen:

- Zunächst wird eine Sequenz von Zahlwörtern produziert.
- Es müssen die zu zählenden perzeptiven Einheiten isoliert werden, d.h. die Zählenden müssen jede einzelne Entität als etwas zu Zählendes, als Etwas, das gezählt werden kann, auffassen (vgl. Steffe et al., 1983).
- Es wird eine Sequenz von Zeigehandlungen (z.B. deuten) produziert, welche die in der Zeit geäußerten Zählworte mit den räumlich angeordneten Objekten so koordiniert, dass über die Herstellung von Raum-Zeit-Einheiten zwei Sequenzen jeweils Eins-zu-Eins korrespondieren: Eine Korrespondenz zwischen Wort und Zeigehandlung und eine Korrespondenz zwischen Zeigehandlung und Objekt, wobei erstere zeitlich, letztere räumlich determiniert ist. Beim Abzählen müssen also eine zeitliche und eine räumliche Sequenz koordiniert werden, was zu einer eindeutigen Verknüpfung von diskreten Zählzeichen und diskreten Objekten führt. Die Verletzung einer dieser Korrespondenzen führt jeweils zu charakteristischen Zählfehlern, die kleine Kinder machen.

- Es wird eine Strategie entwickelt, die zu zählenden Objekte zu reihen oder zu sequenzieren (so zeigen noch 5jährige Schwierigkeiten, größere nicht-lineare Anordnungen beim Zählen zu sequenzieren).

Das Zählen von Entitäten in der Zeit (Ereignisse) hat eine einfachere Struktur und die folgenden Merkmale:

- Produktion einer Sequenz von Zählwörtern.
- Isolation der zu zählenden Einheiten.
- Produktion der Zählreihe in Eins-zu-Eins-Übereinstimmung mit der Reihe der Ereignisse in der Zeit (Eins-zu-Eins-Korrespondenz zweier Zeitreihen).

Fuson weist darauf hin, dass kleine Kinder nicht zählen, um den kardinalen, ordinalen oder den Maßzahlaspekt zu ermitteln. Ein Beleg dafür sieht sie darin, dass Kinder erneut zählen, wenn man sie nach dem Wieviel der Menge fragt oder diese oft nicht mit dem letztgenannten Zahlwort bezeichnen, wobei laut Fuson begrenzte Gedächtnisressourcen ausgeschlossen werden können. Es findet ein Übergang vom Abzählen zum Verständnis der Kardinalität statt, wenn das letztgenannte Zahlwort als Benennung der zuletzt gezählten Entität in seiner kardinalen Bedeutung als Bezeichnung des Wieviel der gesamten Menge verstanden wird. Der Übergang vom Abzählen zum Verständnis der Ordinalität ist offensichtlicher, da eine andere sprachliche Form des Zahlwortes verwendet wird, "eins, zwei, drei, vier, fünf - das ist das fünfte Bonbon". Im Falle des Kardinalitätsverständnisses ist es problematischer, aus dem wiederholten Nennen des zuletzt genannten Zahlwortes auf das Kardinalitätsverständnis zu schließen.

Fuson (1988a) erwähnt den Umstand, dass 2- bis 3jährige Kinder unter Umständen kleine Mengen mit einem kardinalen oder ordinalen Zahlwort benennen können, ohne diese zu zählen und dies, obwohl sie in beobachtbarer Weise abzählen, wenn sie explizit darum gebeten werden. Diese nichtabzählende Erfassung einer kleinen Menge von Objekten, die zusammen im visuellen Feld gegeben sind, wird mit Subitizing bezeichnet. Fusons Ansicht nach lassen sich alle numerischen Kompetenzen von Tieren mit diesem nichtabzählenden Mengenerfassungsprozess erklären. Ebenso weist Fuson auf den bereits dargestellten Sachverhalt hin, dass numerische Kompetenzen, die das Eins-zu-Eins-Prinzip und eine stabile Zählmarkensequenz umfassen, keineswegs mit der Zählkompetenz gleichzusetzen sind.

3 Wahrnehmung kleiner Anzahlen: Subitizing

3.1 Objektwahrnehmung als Voraussetzung des Subitizing

Eine Voraussetzung des Zählens besteht darin, dass Objekte oder Ereignisse voneinander unterschieden werden können. Der Zählvorgang selbst ist ein sukzessives Unterscheiden, in dessen Verlauf Objekte oder Ereignisse hinsichtlich ihrer numerischen Identität unterschieden und bestimmt werden. Geht man von der alltäglichen, ökologischen Wahrnehmungssituation aus und beschränkt sich auf das Sehen und Hören, so ist phänomenanalytisch festzustellen, dass wir stets eine Szene, nie nur ein Objekt oder ein Ereignis wahrnehmen. Vielmehr erscheinen uns innerhalb einer bestimmten Zeitspanne mehrere Objekte, die vor uns liegen, die auch angefasst oder in die Hand genommen werden können, solche, die weiter weg sind, solche, die wir nicht tragen können, solche, um die wir herum, in die wir hinein gehen können und Bereiche oder Stellen, die für uns unzugänglich sind. Die Objekte werden in einem räumlichen Bezugssystem wahrgenommen (Mack, 2000). Verbunden damit hören wir mehr oder weniger deutliche Geräusche, die in der Zeit kommen oder gehen, wie Stimmengewirr im Hause, das An- und Abschwollen von Fahrgeräuschen der Autos auf der Straße oder das ununterbrochene Rauschen des Heizkörpers. Wir können uns bestimmte Gerüche vergegenwärtigen und Objekte betasten und so in körperlichen Kontakt mit der Umgebung treten. Wichtig ist, dass wir diese Szene nach Bereichen, Orten, Dingen und nach funktionalen Bezügen wie Zugänglichkeit oder Verwendbarkeit gegliedert erleben. Trotz wechselnder Perspektiven, dadurch, dass wir uns oder die Dinge oder beide sich bewegen, erscheinen uns die ausgliederten Dinge und Bereiche unseres Wahrnehmungsraumes als recht konstant. Kaum ein Mensch erlebt sich und seine Umgebung als in dauernder Veränderung begriffen. Den Baum vor unserem Fenster halten wir für den selben, auch dann, wenn sich sein Laub im Verlaufe der Jahreszeiten ändert. Wir gehen davon aus, dass solche Dinge qualitativ und numerisch identisch sind. Diese grundlegende, dauerhafte Identität eines Objektes ist für uns so selbstverständlich, dass sie selten problematisiert wird. Ausgangspunkt ist der einfache Umstand, dass sich eine Person P (oder allgemein ein Organismus O) in einer Umgebung U befindet. Damit P in der Umgebung U agieren kann, muss P nicht nur bestimmte Eigenschaften von U repräsentieren, sondern auch seine eigenen Beziehungen zu U. So muss eine selektive Repräsentation von U/P aufgebaut und laufend aktualisiert werden, U'/P' (vgl. Prinz, 1990). Diesem Zweck dienen die Wahrnehmungsprozesse, die jedoch die Informationen über den Zustand des Systems U/P nur dann nutzen können, wenn diese reliabel und stabil sind. Ohne dauerhafte Objektidentität, meist Objektpermanenz genannt, kann diese Funktion des Wahrnehmungssystems nicht erfüllt werden. Für den Aufbau des psychischen Systems ist die Objektidentität so grundlegend wie der Satz von der Identität für den Aufbau eines logischen Systems.

Freilich darf die Repräsentation U'/P' nicht einfach mit U/P gleichgesetzt werden. Im Gegensatz zu einem naiven Realismus, der annimmt, dass die Repräsentate U'/P' identisch mit den Repräsentanda U/P wären, wird von einem kritischen Realismus ausgegangen. Dieser besagt, dass die Repräsentate keine Reduplikationen der Repräsentanda sind, sondern Produkte der Umgebungseigenschaften und der organismischen Organisation. Das kritische Moment besteht darin, dass die psychophysische Struktur z.B. der Sinne und des ZNS wesentlich an der Genese der

Repräsentate beteiligt ist, wobei sich diese Genese in einem weiten Sinne als Prozess vom Typ des Er- und Berechnens auffassen lässt. Ein weiteres kritisches Moment ist darin zu sehen, dass die dreistellige Repräsentationsrelation R: "Repräsentanda a stehen mit Repräsentaten b bezüglich eines Systems S in einer Repräsentationsrelation R: aRbS", als hypothetisch anzusehen ist. Herrmanns (1988) kritische Analyse der meist leichtfertigen, automatisierten Verwendung des Begriffes der mentalen Repräsentation ist nach wie vor aktuell, da selten angegeben wird, was mentale Repräsentationen sind. Sie mit neuronalen Zuständen gleichzusetzen setzt eine Lösung des psychocerebralen Problems voraus. Es ist sinnvoll, den Begriff der mentalen Repräsentation als Modellgröße und damit als Interpretationskonstrukt zu nehmen. Gleiches gilt für die Annahme, dass mentale Repräsentationen die Daten sind, auf die computationale Prozeduren zugreifen. Das realistische Moment des kritischen Realismus besteht darin, dass die Repräsentate U'/P' zuverlässige Informationen über U / P liefern, die für die erfolgreiche Steuerung des Verhaltens von P wirksam sind. Modelltheoretisch betrachtet, liefern die Repräsentate U'/P' ein laufend adjustiertes Situationsmodell für P, das abstrakter oder selektiver Natur ist, da nicht alle Informationen im Verhaltensfluss aus U/P entnommen oder gleichgewichtig verwertet werden. Diese Situationsmodelle sind semantische Modelle erster Ordnung, deren Erforschung durch Psychologie, Kognitionswissenschaft, Philosophie oder Neurowissenschaften zu semantischen Modellen höherer Ordnung führt, deren Gültigkeitsbedingungen epistemologisch, methodologisch und wissenschaftstheoretisch festzulegen sind.

Die Objektidentität ist eine Organisationsleistung des Wahrnehmungssystems, wobei diese Objekte strukturierte Bestandteile einer strukturierten visuellen Szene sind. Sie ist eine Konstanzleistung, an der Größen-, Form-, Helligkeits- und Farbkonstanz beteiligt sind. Wie wird in der Wahrnehmung ein Objekt konstituiert? Bei der Wahrnehmung einer visuellen Szene kann man mehrere Dinge und Merkmale gleichzeitig sehen. Die Information aus einer visuellen Szene wird nach und nach durch sukzessive Augenbewegungen entnommen, da die foveale Fixation nur einen kleinen Ausschnitt erfasst. Während der Sakkade wird kaum Information aufgenommen (z.B. Matin, 1974) und unsere Wahrnehmung setzt sich aus einer zusammenhängenden, geordneten visuellen Szene aus einer Sequenz von Blickpunkten zusammen, was wir aber nicht so erleben. Bei der Erforschung der Objektwahrnehmung wird auf einen Ausschnitt aus der visuellen Szene fokussiert, weswegen auf Gesetzmäßigkeiten der Szenenwahrnehmung nicht detailliert eingegangen werden soll (vgl. Intraub, 1997). Allerdings spielen Gesetzmäßigkeiten der objektübergreifenden Wahrnehmungsorganisation, die Gestaltgesetze, eine Rolle bei der bereichsmäßigen Untergliederung der visuellen Szene, zu der auch einzelne Objekte gehören.

Zu den Gestaltgesetzen gehört im zweidimensionalen Fall die Trennung von Figur und Grund. Diese Trennung ist nicht aus den lokalen Reizgrundlagen ableitbar, sondern es wird die globale Struktur miteinbezogen, die die Gliederung in lokale Oberflächen- und Figurbeschaffenheiten leitet. Die Art und Weise, in der dann die Binnengliederung der Figuren erfolgt, ist durch weitere Gestaltgesetze beschreibbar, die Gliederungsprinzipien kennzeichnen. Auch bei der figuralen Binnengliederung ist das Verhältnis aus globalen und lokalen Strukturmerkmalen wichtig. Im zweidimensionalen Fall kann man schwarz-weiße Figuren in elementare Bestandteile zerlegen, die aus unterschiedlich orientierten schwarzen Linien- oder Punktezügen, Junktoren und Kanten auf weißem Hintergrund bestehen. Noch elementarer gesehen handelt es sich um eine Verteilung von Kontrasten. Meist sieht man jedoch

eindeutige Figuren, die natürlich aus ihren Teilen aufgebaut erscheinen. Ein wirksames Gliederungsprinzip ist häufig das Prinzip der guten Fortsetzung: An Schnittpunkten und Übergängen wird die Gliederung so vorgenommen, dass Begrenzungslinien ihre Richtung und Struktur fortsetzen. Einzelne Merkmale wie Punkte können auf einer Linie liegend gesehen und so gruppiert werden. Ein anderes Gruppierungsprinzip ist das der Nähe: Punkte, die nahe zusammenliegen, bilden eine Gruppe im Vergleich zu von einander entfernter liegenden Punkten. Gerade dieses Prinzip ist beim Wahrnehmen von Mengen oder Anzahlen bedeutsam. Mit dem Gesetz der Gleichartigkeit (Ähnlichkeit) (vgl. Metzger, 1953) wurden weitere Gesetze formuliert, aber das Gesetz der guten Gestalt, das Prägnanzgesetz, lässt sich als Rahmengesetz aller Gestaltgesetze auffassen (Metzger, 1982), mit dem zum Ausdruck gebracht werden soll, dass von allen, kombinatorisch möglichen Strukturierungen nur bestimmte, prägnante Strukturen wahrgenommen werden. Die Prägnanz ist eine Weise der Gestaltorganisation, die beispielsweise Kriterien der einfachsten, der symmetrischsten und der vollständigsten Organisation erfüllt. Bei Metzger heißt es dazu:

“Die gegebenen Elemente schließen sich (...) stets so zusammen, dass möglichst einfache, einheitliche (nach Material und Form möglichst glatte, ungebrochene, organische), möglichst dichte (geballte), geschlossene, auf Dauer möglichst feste (...), ferner möglichst symmetrische, gleichgewichtige, ebenbreite, konzentrische usw (...), endlich möglichst ‘vollständige’ und untereinander (...) gleichartige Ganzgebilde entstehen.” (1975, S.109).

Neben diesem organisatorisch-strukturellen Aspekt der Wahrnehmung spielt der selektive Aspekt und damit die Steuerung der Aufmerksamkeit für die Objektwahrnehmung eine bedeutsame Rolle. Beide Aspekte sind in der Frage verknüpft, wie eine Objektrepräsentation hergestellt wird. Eine Objektrepräsentation ist das komplexe Endprodukt der Verknüpfung elementarer Reizrepräsentationen, z.B. von Linien, Punkte oder Schattierungen, mit Adressen des Gedächtnisses, wobei der Vergleich zwischen Reizrepräsentationen und Gedächtnisadressen dem (Wieder-)Erkennen zugrundeliegt. Das Erkennen von Objekten oder Objektkonfigurationen ist damit auch ein Resultat von Lernprozessen. Das Erkennen, so eine kognitionspsychologische Annahme, setzt sich also aus “bottom up”-Prozessen, der Reizrepräsentation und “top down”-Prozessen des Gedächtnisabgleiches, der Intentionbildung und der intentionsgesteuerten Aufmerksamkeit zusammen. Es wird davon ausgegangen, dass die Objektrepräsentation das Produkt elementarer Repräsentationen, sogenannter “Merkmale” (‘features’) oder visueller Primitive (Marr, 1976) ist, analog zu einer Satzrepräsentation, die aus einer sukzessiven, syntaktisch-semantischen Analyse des Lautstromes in Phoneme und Morpheme aufgebaut wird. Analog zum syntaktischen Parsing des Lautstroms kann der Sehstrom syntaktisch analysiert werden (Marr, 1982). Genauso wie das Verstehen des Lautstromes ist das Verstehen einer visuellen Szene kompositional, da sich zahlreiche Einzelheiten unterscheiden lassen, wobei die Frage, ob es sich um selbständige funktionelle Einheiten (Primitive) handelt, Gegenstand der Forschung ist. Wie es beim Verstehen eines Satzes nicht erlebbar ist, “kognitiv impenetrabel” nach Pylyshyn (1980), in welcher Weise aus einer Lautsequenz das Verstehen generiert wird, so ist nicht erlebbar, aus welchen Elementen das Sehen einer Szene wie hergestellt wird. Zwar kann man phänomenanalytisch Einheiten wie Kanten, geschlossene Linienzüge, Hell-Dunkelübergänge oder Punkte unterscheiden, aber diese bedeutungstragenden Bildmorpheme sind aus bedeutungsunterscheidenden Formen, Bildelementen oder Primitiven aufgebaut, deren Konstruktion und Kombination im visuellen System uns nicht bewusst ist. Diese Primitive sind Objekt- oder

Bildbestandteile, die wir nicht sinnvoll interpretieren können. Erst auf der Ebene der Bild- oder Objektmorpheme handelt es sich um diejenigen minimalen Bild- oder Objektbestandteile, denen wir eine bestimmte Interpretation zuweisen können (Rahmstorf, 1992). Bei Marr und Forschungsarbeiten in seiner Tradition stehen vor allem die frühen visuellen Informationsprozesse im Mittelpunkt, an denen dann top down-Prozesse ansetzen können. Ullman (1984) knüpft an die Arbeiten Marrs an und unterscheidet zwei Hauptphasen der visuellen Repräsentationskonstruktion: In der ersten Phase werden "base representations" erstellt, an denen dann in der zweiten Phase visuelle Routinen ansetzen. Diese visuellen Routinen sind Sequenzen elementarer Operationen, wobei die Steuerung dieser Routinen nicht mehr ausschließlich vom visuellen Input aus erfolgt. Dieser Auffassung zufolge besteht die visuelle Wahrnehmung in der Anwendung von morphologischen Regeln auf visuelle Primitive, die mnestisch stabile Adressen aufweisen. Aus dem Inventar der Bildprimitive werden mittels der Morphologieregeln Bildmorpheme aufgebaut, deren Repräsentationen ebenfalls in einem adressierbaren Gedächtnisinventar bewahrt werden. Mit diesen Bildmorphemen, z.B. Gesichtsschemata oder Geons im Sinne von Biederman (1987) können Regeln der Bild- und Objektsyntax operieren, die zusammen mit Regeln der Bild-, Objekt- und Szenensemantik (Schemata und Skripts) zu höherstufigen mentalen Modellen des visuellen Verstehens von Objekten und Szenen werden. Wie die linguistischen Syntaxregeln sind diese visuellen Syntaxregeln ebenfalls rekursiv und ermöglichen eine unendliche Vielzahl unterschiedlicher Wahrnehmungen basierend auf einer endlichen Menge von visuellen Primitiven und Regeln (Rahmstorf, 1992). Mit der Frage der Integration elementarer Repräsentationen, im folgenden Merkmale, features oder Primitive genannt, und dem Verhältnis von visuellen Teilen und Ganzen, beschäftigt sich beispielsweise die feature integration theory (FIT) von A. Treisman (1986).

3. 1. 1 Segmentation und Bindung

Das Segmentationproblem besteht darin, eine visuelle Szene adäquat in bedeutungsvolle Einheiten zu zerlegen, z.B. in Vorder- und Hintergrund. Über weite Strecken deckt sich dieses Problem, das besonders im Paradigma der computer vision bearbeitet wird, mit dem klassischen Problem der Figur-Grund-Trennung. Phänomenal kann man sich das Problem anhand von Vexierbildern oder Kippfiguren verdeutlichen. Die Annahme ist, dass noch bevor Objektrepräsentationen oder bedeutungsvolle Einheiten gebildet werden, der visuelle Strom in visuelle Primitive zerlegt wird. Anhand welcher Eigenschaften des visuellen Stromes, wann und in welchem Umfang visuelle Primitive gebildet werden, ob diese konstante oder variable Einheiten sind, und, wenn überhaupt, unter welchen Bedingungen sie variieren, sind Aspekte des Segmentationproblems. Der Segmentierungsprozess erfolgt automatisch und unbewusst, er fordert keine Aufmerksamkeit und findet vor der Objektidentifikation statt, also in einer sehr frühen Phase der visuellen Informationsverarbeitung. Es wird entsprechend angenommen, dass die Analyse vor der Synthese stattfindet und dass Produkte der Synthesen auf die Analyse zurückwirken. Diese Annahme ist mit der konstruktivistischen Position Helmholtz' verträglich, der zufolge das Wahrnehmen in unbewussten Schlüssen besteht und dass das Gehirn als hypothesentestender Mechanismus aufgefasst werden kann (z.B. Singer, 1996; 2000).

Entsprechend muss es gestaltbildende Regeln geben, die auf Eigenschaften basieren, welche alle Objekte oder Szenen gemeinsam haben. Die Verknüpfungsregeln visueller Primitive entsprechen weitgehend den bereits angesprochenen Gruppierungsregeln der Nähe, der Kontinuität, der Kontiguität und der Ähnlichkeit. Eine gruppierende Segmentierung wird weiterhin ermöglicht, wenn sich eine Gruppe von visuellen Primitiven kohärent, in gleicher Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit bewegt. Damit diese Gruppierungsprozesse überhaupt ansetzen können, muss zunächst festgestellt werden, wo überhaupt etwas ist und in welchen räumlichen Relationen diese Orte zueinander stehen. Bevor also das Bindungsproblem gelöst werden kann, welche visuellen Primitive zu welchen Morphemen, welche Morpheme zu welchen Objekten und welche Objekte zu welcher szenischen Konfiguration zu verbinden sind, müssen die Koordinaten dieser visuellen Primitive bekannt sein. Zunächst ist also zu klären, wo etwas ist und was es ist, dann erst kann entschieden werden, was wie zusammengehört. Diese Aufteilung in wo- und was-Analysen findet einige Evidenz in neurobiologischen und neuropsychologischen Arbeiten (z.B. Ungerleider & Mishkin, 1982; Mishkin, Ungerleider, & Macko, 1983), die entsprechende neuro-physiologische Substrate identifiziert zu haben glauben. Auch die feature integration theory und die sie stützenden Experimente gehen von entsprechenden Annahmen über die visuelle Aufmerksamkeit aus, wobei eine lokationsbasierte Lösung des Bindungsproblems vorgeschlagen wird. Ihnen zufolge ist die Analyse der räumlichen Verteilung fixer Ortswerte von Inhomogenitäten bzw. von räumlichen Mustern energetischer Intensitätsunterschiede der Ausgangspunkt der Objektgenese.

Die vorangegangenen Überlegungen liefern die Basis für die Feststellung, dass in der visuellen Wahrnehmung einer Szene meist mehrere bedeutungsvolle Einheiten oder Objekte enthalten sind, ebenso wie in der Wahrnehmung eines Objektes mehrere Bild- oder Objektmorpheme wie Kanten, Punkte, Texturen oder Schattierungen. Sowohl die Objekte als auch die Morpheme sind vereinzelte, durch Segmentations- und Bindungsprozesse entstandene Einheiten, die die Kriterien der Zählbarkeit erfüllen. Sie bilden ein Insgesamt, das im Ablauf analytischer und synthetischer Wahrnehmungsprozesse entsteht, deren Anzahl oder Mächtigkeit eine abstrakte Eigenschaft des Perzeptes ist. Die Einheit ist eine numerische Eigenschaft, die sich auf ihr Vielfaches überträgt. Genauso besteht die numerische Eigenschaft der Objektidentität in der Einheit des Objektes. Diese numerische Identität existiert strenggenommen allerdings nur bei kontinuierlicher Wahrnehmung eines Objektes. Ist die Wahrnehmung eines Objektes unterbrochen, dann ist die Wahrnehmung des Objektes als dasselbe ein Erkennungsvorgang, das Resultat eines Vergleiches der aktuellen Objektrepräsentation mit der gespeicherten vorhergehenden. Diese Objekterkennung kann über das Wiedererkennen einzelner Objektcomponenten gesteuert werden (Biederman, 1987). Hinzu kommt, dass in der aktuellen Informationsverarbeitung stets mehrere Informationseinheiten unterschieden und so lange präsent gehalten werden müssen, bis eine sinnvolle Obereinheit gebildet werden kann. Es stellt sich die Frage, wie viele voneinander unterschiedliche visuelle Stimuli simultan wahrgenommen werden können. Hier kommt man zum Phänomen des Subitizing, das für einen wichtigen elementaren und non-verbalen Prozessbestandteil der numerischen Kompetenz gehalten wird (Davis & Pérusse, 1988). Entwicklungspsychologisch wird dem Subitizing eine steuernde Funktion beim verbalen Zählenlernen zugeschrieben (Cooper, 1984).

3. 2 Subitizing

Subitizing bezeichnet die Fähigkeit von Menschen und Tieren, simultan präsentierte, kleine Mengen diskreter Elemente, meistens Punkte oder Linien, sehr schnell und sehr genau zu identifizieren oder zu unterscheiden (z.B. Gallistel & Gelman, 1991; Trick & Pylyshyn, 1994a). Kaufman, Lord, Reese, und Volkmann (1949) prägten den Begriff "Subitizing", um das Phänomen zu benennen, dass man eine kleine Numerosität unmittelbar wahrnimmt und diese nicht elementenweise zählen muss. Wird eine Numerosität präsentiert, die aus drei Punkten besteht, dann sieht man eine Dreierheit. Von Glasersfeld definierte Subitizing als "immediate, correct assignation of number words to small collections of perceptual items" (1982, S. 214). Des Weiteren betont von Glasersfeld (1982), dass Subitizing eher ein perzeptueller Prozess als ein kognitiver des Abzählens sei. Als repräsentationale Grundlage dieses perzeptuellen Prozesses vermutet er eine Art Mustererkennung.

Da typischerweise in Subitizing-Studien den solcherart erfassten Mengen Zahlworte zugeordnet werden, liegt es nahe anzunehmen, dass eine numerische Diskrimination im Sinne von Abzählen vorgenommen wurde. Aber von Glasersfeld folgend kann davon ausgegangen werden, dass kleine Kinder die Zahlworte eher in nominaler als kardinaler Bedeutung verwenden und z.B. "drei" als Namen für eine bestimmte Konfiguration verwenden. Allerdings könnte die nominale Zahlenwortverwendung eine wichtige Entwicklungsstufe beim Lernen bilden, dass Zahlworte nicht nur Namen für bestimmte Mengenkonfigurationen sind, sondern eine intrinsische, invariante Eigenschaft derselben bezeichnen, die zur Beantwortung der Frage nach dem Wieviel grundlegend ist. (Cooper: "Part of the task of number development (...) is to discover that subitizing and counting yield information about the same thing" (1984, p.188)).

Gelman & Gallistel (1978) gehen davon aus, dass Subitizing kein einfacherer Prozess als das Zählen ist, sondern erst auftritt, nachdem das Zählen funktioniert. Sich auf diese Ansicht beziehend schlugen Davis & Pérusse (1988) vor, zwischen Subitizing vor dem Zählen ('precounting subitizing'), dessen Markierungen ('tags') keine numerische Informationen enthalten, und dem Subitizing nach dem Zählen ('postcounting subitizing') zu unterscheiden. Erst die Marken des 'postcounting subitizing' würden bedeutungsvolle numerische Informationen liefern. Diese Unterscheidung ist auf jeden Fall bedeutsam für die zahlreichen Studien zum Subitizing, die fast alle mit Erwachsenen oder Kindern, die schon zählen können, durchgeführt wurden. In späteren Arbeiten haben Gallistel & Gelman (1992) ihre Interpretation des Subitizing dahingehend geändert, dass sie Subitizing als präverbalen Zählmechanismus auffassen, der diejenigen impliziten Prinzipien enthält, die den Erwerb des verbalen Zählens steuern.

Mit welcher Methode und welchen Befunden wird Subitizing typischerweise gefunden?

Zugrunde liegen Aufgaben, in denen als unabhängige Variable kleine Anzahlen meist im Bereich zwischen 0 und 10 verwendet werden. Als Objekte werden vor allem schwarze Punkte auf weißem Hintergrund verwendet. Als abhängige Variable dienen die Geschwindigkeit und/oder die Genauigkeit der Antworten der Vpn auf die Frage, wie viele Punkte oder Objekte präsentiert wurden. Von dieser Aufgabe gibt es eine Reihe von Variationen (vgl. die Übersicht bei Trick & Pylyshyn, 1994a),

beispielsweise

- hinsichtlich der AV: Reaktionszeit (RT) oder Darbietungszeit zur Bestimmung der Genauigkeit;
- hinsichtlich der Objektdarbietung: Simultan- oder Sukzessivvergleich;
- hinsichtlich der numerischen Differenz der Ziel- und der Auswahlmenge sowie der Anzahl der Auswahlmengen (z.B. ist zu entscheiden, ob 2, 3 oder 4 Punkte gesehen wurden);
- hinsichtlich der Konfiguration der Numerositäten (als Muster, als Zufallsanordnung, als lineare Anordnung);
- hinsichtlich des Schwinkels, unter dem die Objekte präsentiert wurden;
- ob die zu unterscheidenden Numerositäten randomisiert oder geblockt (z.B. ein Block mit 20 Diskriminanda 2 vs 3, ein weiterer Block 3 vs 4, usw.) dargeboten wurden.

Stellt man die RT als eine Funktion der Numerosität der Objekte dar, dann lässt sich überwiegend folgendes Ergebnismuster feststellen: (1) Bis zur Numerosität von vier Items lässt sich nur eine sehr geringe oder keine Steigung der RT finden; die Zuwächse betragen manchmal weniger als 40 msec bis zu maximal 100 msec pro Item. (2) Im Bereich von mehr als vier Items steigt die RT sprunghaft an; jedes zusätzliche Item erhöht die RT um ca. 250-350 msec. Diskontinuitäten dieser Art finden sich nicht nur in RT-Funktionen, sondern auch in den Fehlerraten, Genauigkeitsfunktionen sowie in Einschätzungen der Sicherheit des Urteils, das über die genaue Numerosität abgegeben wurde.

Relativ viel diskutiert wurde die Frage, welchen Bereich Subitizing umfasst und bei welcher Numerosität Zählen beginnt. Die Grenzen für den Subitizing-Bereich reichen von 3 (Atkinson, Campbell, & Francis, 1976) bis 7 (Mandler & Shebo, 1982), wobei diese Variationen deutlich methodologisch bedingt sind, je nach dem, welche Versuchsanordnung und welche Maße verwendet wurden. Die meisten Forschungsgruppen fanden einen Bereich bis 4, sodass auch von der "magischen Zahl" 4 gesprochen wurde (Atkinson et al., 1976; Simons & Langheinrich, 1982).

Obwohl die meisten Forschungsgruppen von einem Bereich bis 4 ausgehen, wurden die statistischen Methoden zur Identifizierung dieses Bereichsumfangs kritisiert. Balakrishnan & Ashby (1991, 1992) kritisierten die statistische Analyse, wie sie typisch für Paradigmen ist, die die mittlere Reaktionszeit (MRT) als abhängige Variable und die Numerosität als unabhängige Variable realisieren. Im Kern geht es ihnen um die Frage, ob die Diskontinuität, die sich bei der empirischen MRT-Numerosität-Funktion im Bereich von 4 finden lässt, statistisch abgesichert werden kann. Im wesentlichen wurden zur Modellierung dieser Diskontinuität ihrer Meinung nach zwei Modelle verwendet: das bilineare und das log-lineare Modell. Das erste nimmt an, dass die Steigung der MRT im Bereich bis 4 klein, ab 4 signifikant größer ist und in beiden Bereichen die Steigung linear anwächst. Jeder der beiden unterschiedlichen Teilfunktionen soll ein unterschiedlicher Prozess zugrunde liegen: der ersten Teilfunktion Subitizing, der zweiten Zählen. Das log-lineare Modell nimmt an, dass es keine Diskontinuität zwischen dem Bereich bis 4 und dem ab 4 gibt, sondern dass die Zeit zur Mengenerfassung eine kontinuierliche Exponentialfunktion der Numerosität ist. Dieses Modell kann aus Theorien zur psychophysischen Diskrimination abgeleitet werden, denen zufolge die Mengenerfassung mit physikalischen Eigenschaften der Mengendarbietung wie Energie, Dichte und Kontrast korreliert ist. Balakrishnan & Ashby (1991) zeigten, dass sich beide Modelle an die empirischen MRT-Numerosität-Funktionen gut anpassen, aber auch, dass bei beiden systematische

Anpassungsfehler auftreten. Sie meinen, dass die Daten eher für ein Ein-Prozess-Modell sprächen und die Annahme von Subitizing als spezifischem Mengenerfassungsmechanismus überflüssig wäre. Vielmehr sei Subitizing nur eines von anderen Phänomenen, die aus der Beschränkung der Informationsverarbeitungskapazität resultierten. Die Anpassungsprobleme des log-linearen Modells würden Ein-Prozess-Modelle ausschließen, die den Zeitbedarf der Enumeration mit der proportionalen Veränderung der Numerosität in Ganzzahlschritten in Zusammenhang bringen. Balakrishnan & Ashby (1992) heben hervor, dass der Zusammenhang zwischen Numerosität und Enumerationsprozess komplexer sei als durch die beiden Modelle angenommen. Sie untermauern mit der Prüfung auf stochastische Dominanz der MRT-Numerosität-Funktionen ihr Argument, dass die allgemeinere Annahme einer kapazitativen Beschränkung der Informationsverarbeitung die spezifischere Annahme eines Subitizing-Mechanismus überflüssig macht.

Mit stochastischer Dominanz wird die schwache Ordnungsrelation von suffizienten Statistiken der MRT-Daten bezeichnet: Die Statistiken von MRT der Numerosität $n+1$ sind gleich oder größer, aber nicht kleiner, als die Statistiken von Numerosität n . Diese Ordnungsrelation bezieht sich auf Statistiken der kumulierten RT-Verteilungsfunktion, der RT-Dichtefunktion und der RT-Überlebensrate-Funktion, die implizieren: $MRT(n+1) \geq MRT(n)$. Um Subitizing als eigenständigen Prozess belegen zu können, müssten sich in den empirischen MRT-Numerositäts-Funktionen Verletzungen der stochastischen Dominanz nachweisen lassen, was aber Balakrishnan & Ashby (1992) zufolge nicht der Fall ist. Allerdings ist diese Kritik nur gültig für das speeded enumeration-Paradigma, in dem die Reaktionszeit als abhängige Variable Verwendung findet.

Schließlich gibt es Hinweise darauf, dass es interindividuelle Unterschiede im Subitizing -Bereich gibt (z.B. Akin & Chase, 1978), aber auch Altersunterschiede (z.B. Trick, Enns, & Brodeur, 1996; Sliwinski, 1997). Dennoch scheint der Wert der oberen Subitizinggrenze sicher über 2 und unter 6 zu liegen.

So wird von zwei unterschiedlichen Enumerationsprozessen ausgegangen: Von einem, der auf kleine Itemmengen spezialisiert ist und sehr schnell, ohne bewusste Anstrengung und fast fehlerfrei abläuft. Dieses ist der Prozess, der mit Subitizing bezeichnet wird. Der zweite Prozess, der langsamer, mit bewusster Anstrengung und mit größerer Fehlerneigung abläuft, wird Zählen genannt, wobei Schätzen als Zwischenstufe für nicht zu große Numerositäten eingeschoben werden kann (Dehaene, 1992). Schätzen wird allerdings nur durch den deutlich größeren Zeitbedarf im Vergleich zu Subitizing operational definiert. Die Enumerationsprozesse werden also ausschließlich aufgrund ihrer Latenzzeiten, ihres Zeitbedarfes oder ihrer Fehlerraten und ohne Funktionsmodell definiert. In der Diskussion um die Komponenten der numerischen Kompetenz halten Thomas & Lorden (1993) Subitizing für einen rein deskriptiven Terminus, der keine akzeptable explanatorische Bedeutung habe. Diese Sichtweise wird allerdings nur von ihnen vertreten. Die meisten Forschungsgruppen, die sich mit numerischen Kompetenzen von Tieren, Kleinkindern und Säuglingen beschäftigen, gehen davon aus, dass Subitizing in engem Zusammenhang mit der Tatsache gesehen werden muss, dass viele Lebewesen zwar kleinere Numerositäten exakt unterscheiden können, bei größeren Numerositäten aber nur noch relative Unterscheidungen (mehr vs. weniger) vornehmen, die mit dem Weber-Fechner-Gesetz beschreibbar sind. Dennoch muss die Frage nach einem Funktionsmodell des Subitizing gestellt werden. Es ist keineswegs von der Hand zu weisen, dass Subitizing keine Enumerationsfunktion hat, sondern das Nebenprodukt der Funktionsweise des visuellen Systems ist. Von dieser Annahme gehen

beispielsweise Trick & Pylyshyn (1994a) aus, deren FINST-Modell in 3.2.1 skizziert wird. Zu diesen non-numerischen Modellen des Subitizing gehören auch das Object-file Modell (Kahneman & Treisman, 1984) sowie in gewisser Hinsicht das Akkumulatormodell (Meck, 1983), wohingegen das Numeron-Modell von Gelman & Gallistel (1978) als ein numerisches Modell des Subitizing zu bezeichnen ist. Integriert wurden die non-numerischen Modelle in den theoretischen Rahmen der visuellen Objektkonstitution, der Indexingtheorie von Leslie et al. (1998), die ebenso wie Trick & Pylyshyn (1994a) Bezug auf die Segmentations- und Bindungsproblematik nimmt. Alle diese Modelle haben gemeinsam, dass sie ausschließlich auf das visuelle System beschränkt sind. Fragen der auditiven Enumeration, eines auditiven Subitizing und möglicher Bezüge zu auditiven Segmentationsprozessen werden seltener behandelt. Auf diese Problematik wird später eingegangen. Bevor die numerischen und non-numerischen Ansätze zum Subitizing und zum Zählen skizziert werden, werden drei alternative Erklärungen angesprochen, die nicht geeignet sind, Subitizing zu erklären, weil sie die folgenden Fragen nicht beantworten können: (1) Warum ist Subitizing auf einen so kleinen Numerositätsbereich beschränkt? (2) Warum können beliebige Items mittels des Prozesses des Subitizing erfasst werden? (3) Wie kommen die (unterschiedlichen) Steigungen im Subitizing- und im Zählbereich der Enumerationsfunktionen zustande?

3. 2. 1 Ältere Erklärungsansätze

3. 2. 1. 1 Ortsfrequenz

Der Ausgangspunkt dieses Erklärungsansatzes ist die Tatsache, dass mehr Objekte auf gleicher Fläche dichter zusammen liegen als weniger, größere Numerositäten auf gleicher Fläche also eine höhere Ortsfrequenz aufweisen. Glezer et al. (1973) fanden Neuronen im Cortex der Katze, die sensitiv für Anzahlen waren, aber nur im Bereich niedriger Ortsfrequenzen. Atkinson, Campbell, & Francis (1976) schlossen daraus, dass die Begrenzung des Subitizing auf kleine Anzahlen damit zusammenhängt, dass anzahlensensitive Einheiten für höhere Ortsfrequenzen fehlen. Träfe das zu, so Trick & Pylyshyn (1994a), würde Subitizing nur bei gleichgroßen, gleichabständigen und linear angeordneten Punktemustern auftreten. Subitizing tritt jedoch auch bei Objekten auf, die unterschiedlich viele Konturen haben, z.B. unterschiedlich konturierte dreidimensionale Figuren, die sich teilweise sogar verdecken (Akin & Chase, 1978). Subitizing findet also auch auf der Ebene von Objekten statt und ist nicht auf Objektprimitive wie Konturen begrenzt. Folglich kann dieser Ansatz keine zufriedenstellenden Antworten auf die oben gestellten Fragen geben, da er auf die falsche Analyseebene abzielt.

3. 2. 1. 2 Kanonische Muster

Es liegt in der Natur kleiner Numerositäten, dass sie als bestimmte Konfigurationen gesehen werden. Zwei Kreise können durch eine Linie verbunden gesehen werden und bei drei Punkten kann man ein virtuelles Dreieck sehen. Solche "kanonischen Muster" können erkannt und verwendet werden, um die Numerosität der Konfiguration zu bestimmen. Das Dreieck repräsentiert die Kardinalität drei, die Linie zwei. Diese musterbasierte Erkennung von Numerositäten wird allerdings

ab vier Objekten schwieriger, da die Anzahl möglicher Muster exponentiell zunimmt. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem Ortsfrequenz-Ansatz ist darin zu sehen, dass die Konfigurationen jeweils eine Funktion ihrer tragenden Elemente sind. Mandler & Shebo (1982) zeigten außerdem, dass das Erfassen größerer Numerositäten mit Hilfe von Musterbildungen verbessert werden kann. Doch kann auch dieser Ansatz Subitizing nicht erklären (Trick & Pylyshyn, 1994a, b): Die Muster verlieren schon ab drei Items ihre Eindeutigkeit als Hinweisreiz. Noch wesentlicher für die Bewertung dieses Ansatzes sind Befunde, dass lineare Dreierkonfigurationen nicht mit linearen Zweierkonfigurationen verwechselt werden und dass es keine Unterschiede hinsichtlich Reaktionszeit (RT) und Genauigkeit zwischen linearen und nicht linear angeordneten Mustern gibt. Keine Versuchsteilnehmerin kann sicher sein, dass jede lineare Anordnung zwei ist und jede dreieckige drei, weswegen eine niedrigere RT und eine geringere Genauigkeit zu erwarten wären. Außerdem wurde Subitizing mit linearen Anordnungen größer als 3 Numerositäten gefunden (z.B. Frick, 1987). Der zu erwartende lineare Anstieg in den Reaktionszeiten von einem Punkt über einer Linie bis zu einem Dreieck wurde nicht bestätigt. Dieser Ansatz liefert schließlich auch keine Erklärung für die zu beobachtende Diskontinuität in den Reaktionszeitlatenzen, die Subitizing von "Zählen" trennt.

3. 2. 1. 3 Arbeitsgedächtnis

Eine einfache Erklärung dafür, dass nur eine kleine Numerosität von Items per Subitizing erfasst werden kann, ist die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses (AG). Hat das AG beispielsweise nur 4 Fächer und ist die zu erfassende Anzahl größer als vier, dann müssen Fächer sukzessive ins Langzeitgedächtnis entleert werden, was mehr Zeit kostet. In diesem Zusammenhang ist die klassische Arbeit von Miller (1956) zu nennen, dessen "magische Zahl" 7 mit einem Toleranzbereich von 2 durchaus in die Nähe des Subitizingumfangs kommt, wenn man berücksichtigt, dass Miller im Gegensatz zu den erheblich höheren Genauigkeitsanforderungen der meisten Subitizing-Studien eine Leistungsgenauigkeit von 50% tolerierte. Trifft der AG-Ansatz zu, dann sollte Subitizing unabhängig von der Art des zu erfassenden Materials sein. Es sollte keine Rolle spielen, ob räumlich verteilte Objekte oder zeitlich verteilte Ereignisse numerisch erfasst werden (z. B. Töne oder Lichtblitze).

Es gibt allerdings Befunde, wenn auch nicht zufriedenstellend gesichert, die die Vermutung erhärten, dass Ereignisse anders als Objekte enumeriert werden. Die Untersuchungen Taubmans (1950) legen nur bei einem akustischen Signal große Genauigkeit des Erfassens nahe, wohingegen Zweier- und Dreier-Signale sehr häufig verwechselt werden. Der hohe Genauigkeitsbereich im Falle der räumlichen Objekte umfasst jedoch noch zwei und drei. Ein weiterer Aspekt ist die Gleich- oder Verschiedenartigkeit des Aussehens der Items. Bei der räumlichen Enumeration spielt diese keine Rolle, bei der Ereignisenumeration trifft dies nicht zu. Gleichdauernde, punktuelle Tonsignale beim Morsen werden im Subitizingbereich fehlerhafter erfasst als alternierende Folgen aus längeren und kürzeren Tönen.

Weitere Hinweise auf die Unterschiedlichkeit von Ereignis- und Objektenumeration sind aus Doppelaufgabenparadigmen zu entnehmen. Logie & Baddeley (1987) untersuchten den Effekt einer zusätzlichen Gedächtnisanforderung auf das Enumerieren. Die Sekundäraufgabe bestand in der Unterdrückung innerer Artikulation durch wiederholtes Aussprechen von "the the the.." während des Enumerierens. In einer Aufgabe mussten räumlich verteilte Objekte, in einer anderen kurze Lichtblitze

erfasst werden. Im Falle der räumlichen Mengenerfassung hatte der Distraktor keinen Effekt, anders im Falle der zeitlichen, wo er sich sogar auf die Latenz des Erfassens eines Lichtblitzes auswirkte. Es scheint also keinen amodalen Subitizing-Mechanismus zu geben; zumindest scheint beim räumlichen Subitizing ein anderer Ultrakurzzeitspeicher verwendet zu werden als beim zeitlichen Subitizing.

Die unterschiedlichen Steigungen der RT-Funktionen im Bereich des Subitizing bzw. des Zählens wurde von Klahr (1973b) im Rahmen seines Produktionssystemmodells des Subitizing mit Sternbergs (1966) Kurzzeitgedächtnisrate von 40ms/Item zu erklären versucht. Die Steigung im Subitizingbereich stamme daher, dass Items mit Zahlennamen gepaart werden müssten. Dies ist typisch für 'post-counting'-Subitizing. Die Steigung im Bereich des Zählens rühre aus zusätzlichen Operationen wie die bereits gezählten Items markieren, Arbeitsgedächtniseinträge ins Langzeitgedächtnis übertragen oder gruppenweise addieren

Problematisch bei diesem Erklärungsansatz ist folgendes: Wenn Subitizing davon abhängt, dass mehr Fächer im AG frei als Items zu enumerieren sind, dann würde eine zusätzliche Gedächtnisbelastung das Subitizing beeinträchtigen und den Subitizing-Bereich verkleinern. Das steht im Widerspruch zum Befund von Logie & Baddeley (1987), dass Distraktoren auf räumliches Subitizing keinen Einfluss hatten, auch für Distraktoren aus der gleichen Modalität finden sich keine Effekte. Trick & Pylyshyn (1993) ließen Versuchsteilnehmer O's auf dem Hintergrund von vier X's erfassen, was keine Auswirkung auf die O's hatte. Bestand der Hintergrund aus Q's, gab es allerdings eine Beeinträchtigung der Enumeration der O's. Diese Beeinträchtigung kann jedoch nur schwer durch die Annahme einer beschränkten Gedächtniskapazität erklärt werden. Es scheint also so zu sein, dass Subitizing erheblich weniger als Zählen vom AG abhängig ist.

3. 2. 2 Modelle des Subitizing

3. 2. 2. 1 FINST-Modell

Dieses Modell geht auf Pylyshyn und Mitarbeiterinnen zurück und wurde in verschiedenen Kontexten der frühen visuellen Analyse und Synthese entwickelt, angewendet sowie fortgeschrieben (Pylyshyn, 1989; 1994; Pylyshyn & Storm, 1988; Trick & Pylyshyn, 1994a; Scholl & Pylyshyn, 1999). Es hat den Vorzug gegenüber anderen Modellen, z.B. dem Object-file Modell von Treisman (vgl. 3.2.2.2), dass es sich um die detaillierte Beschreibung und Klärung von Mechanismen der frühesten visuellen Repräsentationen bemüht. Die folgende Darstellung des Modells lehnt sich an Trick & Pylyshyn (1994a) an, die in überzeugender Weise Subitizing als einen Effekt der Arbeitsweise des visuellen Systems interpretieren.

Ihrer Ansicht nach resultiert das Subitizing aus der Art und Weise, wie die räumliche, parallele (präattentive) und die serielle (attentive) Verarbeitungsstufe im visuellen System koordiniert werden. Das Phänomen Subitizing sei Resultante eines präattentiven kapazitätsbegrenzten Mechanismus, dessen Zweck in der Individuierung einer kleinen Anzahl von Merkmalsbündeln ('feature clusters') besteht, den sie FINST (FingerINSTantiation) nennen. Letztlich ist ihr Modell eine Ableitung aus Modellannahmen zur frühen visuellen Analyse und Synthese, wie sie Marr (1982) und Ullman (1984) entwickelten und auf die sie ausgiebig Bezug nehmen.

Trick & Pylyshyn (1994a,b) gehen von drei Hauptstufen der visuellen Analyse aus: (i) Die Stufe der räumlich parallelen Analyse, (ii) die Stufe der räumlich seriellen Analyse und (iii) die Stufe der Objekt(wieder-)erkennung.

Zur Stufe (i): Auf der Stufe der räumlich parallelen Analyse erfolgt die Verarbeitung präattentiv, es werden Merkmale oder visuelle Primitive wie Farbe, Helligkeit, Orientierung, Kurvaturen oder Junktoren registriert, die zu Objektmorphemen wie Kanten oder allgemeiner Segmentationsgrenzen verbunden werden können. Beispielsweise ist der Übergang von einer roten Fläche zu einer grünen eine Kante. Das Registrieren der Merkmale erfolgt über Merkmalsdiskontinuitäten und über die Zuweisung eines Platzmarkers (Marr,1982). Die Zuweisung der Platzmarker erfolgt parallel, d. h. die Merkmale eines Bildes (die Repräsentate einer visuellen Szene) werden simultan markiert. Als Beleg für diesen parallelen präattentiven Prozess wird der Pop-out Effekt herangezogen: Es kostet genauso viel Zeit, ein rotes Item unter 30 grünen zu entdecken wie 10 rote Items unter 30 grünen, d.h. die Merkmalsentdeckung in dieser Phase ist unabhängig von der Numerosität.

Auf diese präattentive Merkmalsregistrierung folgt die Gruppierung der Merkmale. Die Platzmarker sind der Input für diesen präattentiven Gruppierungsprozess, der Bindungen von Merkmalen unter Verwendung von Diskontinuitäten erzeugt, wobei die gestalttheoretischen Gruppierungsgesetze das Geschehen beschreiben können. Die Folge ist, dass es zu einer Textursegregation kommt (z.B. Beck, 1982; Julesz, 1984), in der nebeneinander liegende, ähnliche Diskontinuitäten zu einer Region verbunden werden, die als ganze eine virtuelle Grenze zu der sie umgebenden Region aufweist, z.B. eine quadratisch aussehende Region aus vertikalen Linien vor dem Hintergrund horizontaler Linien.

Diese Gruppierungsprozesse können Marr zufolge hierarchisch und rekursiv sein. Die vier Ortsmarker, die jeweils eine der vertikalen Linien markieren, können durch einen Ortsmarker ersetzt werden. Wichtig ist festzuhalten, dass die Segmentierungs- und Bindungsprozesse vor den räumlich seriellen ablaufen, die einen Bereich pro Zeiteinheit verarbeiten und Aufmerksamkeit fordern.

Die zweite Stufe (ii) geht über die Errechnung retinaler Ortswerte hinaus und findet auf der Ebene der Objektmorpheme statt, aus denen das Objekt gebildet wird. Ullman (1984) folgend werden auf dieser Stufe die visuellen Routinen aktiv, die Anzahl und räumliche Relationen wie 'innerhalb' oder 'verbunden mit' errechnen. Diese Routinen haben einen Verarbeitungsfokus und arbeiten Ort für Ort nacheinander ab. Ullman (1984) benutzt in diesem Zusammenhang die 'spotlight'- Metapher der Aufmerksamkeit (z.B. Eriksen & Hoffman, 1972, 1973; Laberge, 1983; Posner, Snyder, & Davidson, 1980), wobei er allerdings alle weiteren Konnotationen des Begriffs Aufmerksamkeit unbeachtet lässt und Aufmerksamkeit im wesentlichen mit der räumlich-seriellen Operationsweise gleichsetzt. Im Fokus der Verarbeitung durch visuelle Routinen werden vor allem fünf elementare Operationen realisiert: das Indizieren ('indexing'), das Markieren ('marking'), das Grenzflächenfolgen ('boundary tracing'), das Abtasten ('scanning') und das Farbzuweisen ('coloring'). Die visuellen Routinen setzen sich aus diesen elementaren Operationen zusammen, wobei für das Subitizing das Indizieren und Markieren von primärem Interesse sind. Ullman (1984) versteht unter Indizieren die Ausrichtung des Aufmerksamkeitsfokus auf ein Merkmalsbündel oder eine Diskontinuität. In einer Suchaufgabe richtet man beispielsweise seine Aufmerksamkeit auf das Objekt, das sich von allen anderen unterscheidet. Indizieren tritt auch auf, wenn ein peripherer Hinweisreiz z.B. in Form eines Lichtblitzes dort gegeben wird, wo in Kürze ein Zielobjekt auftauchen wird. Pylyshyn (1989) verwendet allerdings den Ausdruck

‘Index’ anders: Ihm zufolge wird ein Zeiger (Index) präattentiv einem Merkmalsbündel zugewiesen, wohingegen Ullmans Indizieren durch das bewusste Verlagern des Fokus Aufmerksamkeit erfordert. Wird im folgenden das Zeigerzuweisen im Sinne von Pylyshyn gemeint, so wird von Indexing gesprochen, ansonsten von Indizieren. Das Markieren ist das Kennzeichnen derjenigen Items, die bereits im Zentrum der Aufmerksamkeit standen. Ohne Markieren würden beim Suchen Endlosschleifen durchlaufen.

Wie bereits erwähnt ist die Anwendung der visuellen Routinen ein zielbeeinflusster top down-Prozess, der in der räumlich-seriellen Analyse mit bottom up-Prozessen zusammentrifft.

Die Stufe (iii) schließlich ist die Phase der Objekterkennung, in der die Strukturbeschreibung des Objektes mit Gedächtnisrepräsentationen ähnlicher Objekte verglichen wird. Fällt der Vergleich positiv aus, so kann das Objekt kategorisiert oder benannt werden.

Exkurs: Welche Zusammenhänge bestehen zwischen visuellen Routinen und dem Subitizing?

Ullman (1984) zufolge ist die Enumeration durch einen räumlich-parallelen Mechanismus nicht möglich, weil die Simultanenumeration aufgrund der Mehrdeutigkeiten der Merkmalsegmentationen und -bindungen (Differenzen hinsichtlich Größe, Form, Grenzflächen, Konturierungen) nicht zu realisieren ist. Folglich ist zur Enumeration ein räumlich-serieller Mechanismus vonnöten. Der lineare Zusammenhang zwischen Anzahl und Latenzzeit scheint dieser Annahme Recht zu geben. Ullmans Routinen des Indizierens und Markierens brauchen nur mit einer Gedächtnisfunktion versehen zu werden, dann funktioniert das Markieren mit einem Zähler, der mit jeder Markieroperation um eine Einheit erhöht wird und dessen Zustand am Ende ausgelesen wird. Das Markieren kann folglich zum Enumerieren dienen, wenn der Zähler am Ende des Enumerierens mit einem Referenzgedächtnis verglichen wird. Ein solcher Mechanismus kann mit kleinen Netzen aus Modellneuronen simuliert werden (z.B. Braitenberg, 1993).

Allerdings weisen Trick & Pylyshyn (1994a) auf die häufigen Diskontinuitäten der Enumerationszeiten von kleinen und größeren Numerositäten hin, die nicht mit dieser Annahme des Funktionierens visueller Routinen im Einklang stünden. Aus diesem Grunde konzentrieren sie sich auf die Operation des Indizierens, deren detaillierte Analyse Aufschluss darüber geben soll, ob diese Widersprüchlichkeit zum Verschwinden gebracht werden kann.

Das Bewegen des Aufmerksamkeitsfokus wird mit dem Fahren zwischen Städten verglichen. Dies setzt das Wissen voraus, wo man ist und wo man hin will. Es muss also ein Zielort ausgewählt werden und dieser Zielort muss gegenüber anderen Orten ausgezeichnet sein. Wie könnte dieses Problem im Bereich des Sehens gelöst werden? Angenommen, man achtet innerhalb eines Zufallsmusters aus unterschiedlich großen Punkten auf einen Punkt a und möchte auf einen weiter entfernten Punkt b achten. Eine Möglichkeit wäre, dass retinale Merkmale Argumente der Funktion INDEX werden, z.B. INDEX (klein, grau, Punkt). Diese Lösung ist problematisch, da es mehrere Merkmale mit den Argumenten (klein, grau, Punkt) geben könnte. Hinzu kommt, dass sich das Zielmerkmal verändern könnte, während es aufgesucht wird. Daher muss das Zielitem so indiziert werden, dass es seine Identität behält, auch wenn es seine Eigenschaften von (klein, grau, Punkt) in (groß, schwarz, Punkt) geändert hat.

Eine andere Möglichkeit wäre die Verwendung retinaler Koordinaten als Argument der INDEX-Funktion, z.B. INDEX(25,43). Allerdings verändern sich die Koordinaten mit der Augenbewegung, statt Merkmal *b* kann dann Merkmal *d* an dieser Koordinaten liegen. Des weiteren sind die Eigenbewegungen der Merkmale zu berücksichtigen. Auch die Ortskoordinaten der Merkmale auf der Retina liefern also keine identitätserhaltende Kennzeichnung, denn ein Merkmal, das vorher die Koordinaten (25,43) hatte und jetzt (83, 97) hat, muss als "dasselbe" identifiziert werden.

Eine Lösung des Zielidentifikationsproblems lässt sich mit der Städtetourmetapher finden: Da die Städte Eigennamen haben, die z.B. auf Ortsschildern stehen, sind sie trotz variierender Umstände identifizierbar. Entsprechend wäre das Problem im Bereich des Sehens lösbar, bekämen die Punkte Eigennamen wie *a*, *b*, *c* usw. Trick & Pylyshyn (1994a) zufolge ist dies im Bereich des Sehens sogar nötig. Die Veränderungen der Ortswerte und Eigenschaften von Merkmalen sind die Regel, sodass diese Merkmale als identische "gesehen" werden müssen. Die beste Lösung ist also, sie mit Referenzmarken zu versehen, die wie Eigennamen funktionieren, wobei unveränderliche Wahrzeichen dieselbe Funktion hätten. Trick & Pylyshyn vergleichen zur Illustration die Referenzmarken mit Zeigervariablen, wie sie in diversen Programmiersprachen verwendet werden. In der Programmiersprache C definiert beispielsweise "&b" eine Zeigervariable, die auf eine Gedächtnisadresse der Variable *b* zeigt. Der Wert von "&b" ist also die Adresse von *b*. Der Vorteil eines solchen Referenzsystems ist, dass sich der Wert von *b* verändern kann, *b* aber durch "&b" identifizierbar bleibt. Im Bereich des Sehens erlaubt die jederzeit mögliche Aktualisierung einer Zeigervariablen die Lösung des Bewegungskorrespondenzproblems. Dieses besteht darin festzustellen, welches Item der einen Blickperspektive welchem Item in der nächsten Blickperspektive entspricht, und beschreibt ein sukzessives Bindungsproblem: Es müssen nicht nur die Einheiten innerhalb eines statischen Bildes, sondern auch die Bildkomponenten aufeinander folgender Bilder miteinander verbunden werden, damit eine für weitere Funktionen nutzbare Szenenfolge entsteht. Die Zeigervariable erlaubt die Ortsadressierung eines Items, das selbst keine Lokationsinformationen tragen muss.

Es müssen jedoch stets mehrere Items auf einmal individuiert werden, da ohne die Bestimmung räumlicher Relationen zwischen Items nicht herausgefunden werden kann, welche Items miteinander verbunden sind. Daher reicht es nicht aus, einen Punkt zu individuiieren, da von ihm unendlich viele Verbindungsmöglichkeiten ausgehen können. Es müssen mehrere Einheiten sowie deren Verbindungen (Kanten) individuiert werden, um die möglichen Verbindungen zu minimieren. Die Individuierungen mehrerer Ortswerte ist nötig, um Relationen wie "ist verbunden mit", "innerhalb", "darunter" oder "neben" bestimmen zu können.

Die FINST-Hypothese

Pylyshyn (1989) schlägt einen FINST genannten Mechanismus vor, der durch die Zuweisung von Referenzmarken in der Art von Zeigervariablen Merkmalsbündel individuiert. FINST steht für "FINGers of INSTantiation", eine "Zeige-Fingergruppe", die wie Finger einer Hand zum Zeigen auf etwas verwendet werden kann, ohne dass damit dem Angezeigten eine bestimmte Eigenschaft zugewiesen wird. Der "Zeige-Finger" wird mit etwas verbunden, was dadurch von anderen, nicht angezeigten Entitäten abgegrenzt wird. Das Angezeigte wird dadurch nur mit einem Ortswert versehen. Dieser FINST-Mechanismus wird innerhalb der visuellen Informationsverarbeitung

zwischen die Stufe der räumlich-parallelen Analyse (i) und der Stufe der räumlich-seriellen Analyse (ii) platziert. Aus zwei Gründen soll FINST genau zwischen der präattentiven und der attentiven Analysestufe liegen: Zum einen gibt es nur eine beschränkte Anzahl von Zeigern ("Fingern"). FINST selektiert Zielorte für den Aufmerksamkeitsfokus, denn es wäre dysfunktional, würde jeder Ort des Bildschemas fokussiert werden. Andererseits muss mehr als nur ein Punkt pro Bild individuiert werden, da sonst keine räumlichen Relationen konstruierbar sind. Es stellt sich also ein Optimierungsproblem, genau so viele Einheiten pro Bild zu individuierten, dass das Bewegungskorrespondenzproblem lösbar ist. Ab einer bestimmten Anzahl sind die kombinatorischen Möglichkeiten so viele, dass von Blickperspektive zu Blickperspektive die Einheitenpassungen nicht mehr herstellbar sind. Doch was ist das Minimum an Items, das individuiert werden muss? Es gibt Hinweise aus Aufgaben zur Identitätswahrnehmung mehrerer sich zufällig bewegender Einheiten (z.B. Storm & Pylyshyn, 1988; Scholl & Pylyshyn, 1999): Beispielsweise bewegen sich 5 Quadrate unvorhersagbar mehrere Sekunden lange mit schnellen, zufälligen und unkorrelierten Bewegungen gemeinsam mit fünf sternförmigen, sich ebenfalls zufällig bewegenden Distraktoren. Vor Beginn der Bewegungsphase sind alle Objekte in Ruhe und die visuell zu verfolgenden Objekte, z.B. drei bestimmte Quadrate, blinken ein paar mal auf. Nach der Bewegungsphase sind wieder alle Objekte in Ruhe und ein Quadrat blinkt auf. Die Vp muss entscheiden, ob dieses Objekt zu den drei Zielquadraten gehört oder nicht. Maximal gelingt es, 5 Zielobjekte zu verfolgen, häufig auch weniger. Nach Pylyshyn (1989) ist die allgemeinste Frage nicht die, wie viel einzelne Einheiten individuiert werden können, sondern die nach der komplexesten räumlichen Relation, die Menschen ohne Hilfsmittel gerade noch realisieren können. Ein Beispiel wäre, so Trick & Pylyshyn (1994a), in einer Anordnung aus mehreren Punkten und gewundenen Konturen 6 Punkte zufällig herauszugreifen und zu prüfen, mit welcher Kontur alle 6 Punkte miteinander verbunden werden können.

Der zweite Grund dafür, dass FINST zwischen der räumlich-parallelen und der räumlich-seriellen Analysestufe eingeschoben ist, liegt darin, dass FINST zwar ein datengetriebener Mechanismus sei, aber von Zielen beeinflusst werden kann. Zwar werden Diskontinuitäten in der bildhaften Repräsentation automatisch Zeiger zugewiesen, aber man kann sich beispielsweise entschließen, nur roten Items inmitten grüner Items Zeiger zuzuweisen. Wenn rote O's zwischen roten N's und grünen O's zu suchen sind, dann werden meist nur rote Items beachtet (Wolfe, Cave, & Franzel, 1989). Diese selektive Zeigerzuweisung ist möglich, wenn sich die Zielitems von den Distraktoren durch präattentive Informationen unterscheiden, da die Zuweisung vor der attentiven Analyse erfolgt. Des Weiteren kann diejenige Auflösungsebene bestimmt werden, auf der Einheiten gebildet und denen Zeiger zugewiesen werden. So kann beispielsweise bei einer kleinen Anzahl eckiger Gebilde deren Gesamtanzahl bestimmt, aber auch die Anzahl der Ecken jedes einzelnen Objektes festgestellt werden. Die top down-Prozesse sollen aber primär an denjenigen Operationen ansetzen können, die dazu dienen, Zieleinheiten für den Aufmerksamkeitsfokus auszuwählen, um indizieren und räumliche Relationen bestimmen zu können. Es wird aber betont, dass diese top down-Prozesse nur unter sehr restringierten Umständen wirksam werden, zu denen gehört, dass die zu individuiierenden Einheiten unterschiedliche Merkmale aufweisen.

Ein wichtiger Aspekt des FINST-Modells besteht darin, dass die Zeigervariablen nicht den Objekten zugewiesen werden. Vielmehr verweisen die Zeigervariablen auf Ortswerte ('place tokens'), welche wiederum zu Einheiten gehören, die nicht notwendigerweise Objekten entsprechen. Trick &

Pylyshyn (1994a,b) meinen, dass lokationsbasierte Objektmorpheme, eventuell auch Primitive, durch "Finger" instantiiert werden: So könnte eine Kontur angezeigt werden, die Element mehrerer Objekte ist, wenn sich etwa mehrere Objekte verdecken. Diese Annahme macht insofern Sinn, da die mehrdeutige Netzhautprojektion erst auf höheren Stufen der visuellen Informationsverarbeitung eindeutig wird, beispielsweise auf der Ebene, auf der das 3D-Bild erstellt wird. Auf der präattentiven Stufe bestehen die Einheiten in Gruppierungen, die durch Gestaltprinzipien beschreibbar sind. Sicherlich gibt es auf dieser Stufe keine Garantie, dass solche Gruppierungen Objekten entsprechen, es wird aber oft der Fall sein. Entwicklungspsychologisch interessant ist daher die Frage, ob häufige Entsprechungen zwischen Gruppierungen und Objekten nicht auch gelernt werden können.

Der zentrale Gedanke der FINST-Hypothese, durch den sie sich von anderen Aufmerksamkeits-theorien unterscheidet, besteht darin, dass es eine Verarbeitungsstufe gibt, auf der eine kleine Anzahl von Ortswerten parallel verarbeitet werden kann. Die FINST-Hypothese, so Trick & Pylyshyn (1994a) würde auch immer dann implizit angenommen werden, wenn davon ausgegangen wird, dass distinkte Merkmale oder Merkmalsbündel ohne Aufmerksamkeitszuwendung individuiert und selektiert werden.

Wie kann die FINST-Hypothese zur Erklärung von Subitizing und Zählen herangezogen werden?

Dass nur kleine Numerositäten per Subitizing erfasst werden können, liegt daran, dass das Merkmale oder Merkmalsbündel individuierte System nur über beschränkte Ressourcen der Merkmalsbindung verfügt. Es gibt nur wenige Referenzmarken, eben FINSTs. Sind alle zugewiesen, muss ein zusätzlicher Prozess in Gang gesetzt werden.

Das Subitizing einer Numerosität, die die FINST-Kapazität nicht überschreitet, erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe ist die der Merkmalsbindung: Zunächst werden jeder Merkmalsdiskontinuität oder Gruppe von Diskontinuitäten Platzwerte zugewiesen. Diesen Ortswerten werden dann Referenzmarken (FINSTs) zugewiesen, die durch den Aufmerksamkeitsfokus zugänglich werden. Eine begrenzte top-down Zuweisung von FINSTs zu Zielortswerten ist dann möglich, wenn die Merkmale Farbe, Orientierung oder Krümmung sind. Diese pränumerische Individuation ist Voraussetzung dafür, dass die Identität der Items geprüft werden kann. Es wäre unmöglich zu wissen, wo man anfangen soll zu indizieren und wo zu stoppen. Phänomenal nimmt man zunächst nur eine Mehrheit von undifferenzierten Gegebenheiten wahr. Dann muss man sich entscheiden, ob diese Numerosität per Subitizing ("auf einen Blick") erfasst werden kann oder ob man zählen muss. Da fast alle Vpn in den Subitizing-Studien zählen können, ist dieses 'post-counting'-Subitizing mit diesem Entscheidungsproblem verbunden, das zur interindividuellen Variabilität der Obergrenze beiträgt. Dies könnte auch Ursache der manchmal gefundenen kleinen Steigung der Numerosität-RT-Funktion im Subitizing-Bereich sein (vgl. Mandler & Shebo, 1982; Atkinson et al., 1976).

Im Falle des 'post-counting' Subitizing besteht die zweite Stufe darin, die Anzahl zu erkennen und ihr das passende Zahlwort zuzuordnen. Das Erkennen der Kardinalität einer Szene oder einer Reizkonfiguration ist wohl kaum ein geometrisches template-match von Reizkonfiguration und Gedächtnis, da die Einheiten aus unterschiedlichsten Morphemen oder Gruppen bestehen können. Ein weiterer Aspekt ist die Abstraktheit der Kardinalzahl z.B. der Zahl "4". Es gibt unendlich viele Möglichkeiten, wie die "4" in einer visuellen Szene realisiert sein kann. Das Erkennen der Kardinalität

weicht von anderen Erkennensprozessen dadurch ab, dass eine bestimmte Kardinalität niedrigere Anzahlen beinhaltet. Aufgrund dieser Inklusionsrelation enthält die Numerosität '4' auch die Numerositäten '3', '2' und '1'. Es gibt daher auch zwei Arten, die Numerosität einer Konfiguration zu verifizieren: Die höchste Numerosität, die zur Konfiguration passt und die niedrigste Numerosität, die gerade von der Konfiguration abweicht. Ersteres erscheint wahrscheinlicher, da es schwieriger ist, negative Instanzen oder das Fehlen von Etwas zu prüfen. Soll daher eine Numerosität bestimmter Kardinalzahl (wieder-)erkannt werden, dann muss jeder individuierten Einheit ein Zahlwort in der Reihenfolge der Zählreihe zugeordnet werden (Klahr, 1973b).

Woher kommt der Anstieg der Reaktionszeit im Subitizing - Bereich?

Dem FINST-Ansatz entsprechend sind zwei wesentliche Quellen für den Anstieg zu bedenken: Zum einen die Phase, in der die FINSTs an die Ortswerte gebunden werden (Bindungsphase) und zum anderen die Phase der Reaktionsauswahl und -realisierung. Je nach abhängiger Variabler, Anzahl der Reaktionsalternativen und der Kontrolle der Augenbewegungen sind unterschiedliche Steigungen zu finden. Größere Steigungen finden sich in Studien, in denen die Reaktion aus einer größeren Zahl von Alternativen gewählt werden musste und die Augenbewegungen nicht kontrolliert wurden. Diese Art von Studien kann man, Trick & Pylyshyn (1994a) folgend, als Enumerationsstudien bezeichnen. Der kleinste Bereich reichte von 1 - 3 Numerositäten (Liss & Reeves, 1983) mit einer Steigung 35msec, der größte von 5 bis 15 (Oyama, Kikuchi, & Ichihara, 1981) mit 370msec. Klahr und Wallace (1976) konnten eine Steigung von 60msec/Item ohne Kontrolle der Augenbewegungen, mit Kontrolle auf eine von 25msec/Item reduzieren.

Deutlich kleinere Steigungen findet man in Studien, die sich als Anzahldiskriminationsstudien (z.B. n vs $n+1$ Punkte) und als Anzahlvergleichsstudien (z.B. gleiche oder verschiedene Anzahl) bezeichnen lassen. Weiterhin werden die Steigungen deutlich reduziert, wenn Maskierungstechniken verwendet werden. Durch diese können nicht nur die Augenbewegungen, sondern auch die Reaktionskomponenten kontrolliert werden. Dies ist möglich, indem Genauigkeitsmaße durch die zeitliche Versetzung der zu vergleichenden Stimuli (stimulus onset asynchry, SOA) ermittelt werden. Wenn eine Maskierungstechnik eingesetzt und die Anzahl der Reaktionsalternativen auf 2 beschränkt wird, dann scheint die Steigung fast ganz zu verschwinden (1.9 msec/Item bei Sagi & Julesz, 1985a). Der Schluss darf gezogen werden, dass die Steigung im Subitizing-Bereich auf die Phase der Reaktionswahl und nicht auf die Variablenbindung zurückzuführen ist.

Sind alle Referenzmarken vergeben und wird entschieden, dass die Menge nicht per Subitizing erfasst werden kann wird gezählt. Durch eine Art "Abtasten" wird ein Bereich der Konfiguration nach dem anderen ins Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt. Dann muss jedes fokussierte Objekt markiert und die Anzahlanzeige um eine Einheit erhöht werden. Die Anzahl kann auch durch eine Gruppieren-und-Addieren-Strategie bestimmt werden: Eine Gruppe wird per Subitizing erfasst und deren Anzahl der bereits festgestellten zuaddiert. Die Inkrementierungseinheit wäre dann beispielsweise 3. Auch dann kann per Zuweisung eines "Zeige-Fingers" vorgegangen werden: Einer Gruppe mit bestimmtem Ortswert wird eine Referenzmarke zugeordnet, auf die der Aufmerksamkeitsfokus gerichtet werden kann, dann wird die Auflösung verfeinert, sodass die "Zeige-Finger" neu auf die Ortswerte innerhalb der Gruppe vergeben werden können. Dies ist möglich aufgrund der Rekursivität des Gruppierungsprozesses. Allerdings ist dieses Vorgehen fehleranfälliger und zeitraubender, da der

Gruppierungsumfang sich an der FINST-Kapazität orientieren muss. Schließlich muss jede Gruppe als “gezählt” markiert werden. Jedenfalls umfasst das Zählen erheblich mehr Verarbeitungsstufen als das Subitizing, auch wenn einige Verarbeitungsstufen parallel und damit unabhängig von der Numerosität ablaufen können, beispielsweise die Feststellung, ob die Konfiguration per Subitizing erfassbar ist, das Gruppieren und das Bilden einer Abtaststrategie. Mit der Numerosität kovariieren sicher die Anzahl der Rejustierungen des Aufmerksamkeitsfokus, die Anzahl der Gruppen und die Dauer des Addierens, denn je größer die Summanden oder deren Anzahl, desto länger dauert die Addition (z.B. Parkman & Groen, 1972). Die Schnelligkeit und hohe Genauigkeit des Subitizing ist also in erster Linie darauf zurückzuführen, dass Subitizing nur zwei Verarbeitungsstufen umfasst, wohingegen Zählen aus erheblich mehr Verarbeitungsstufen und seriellen Suchprozessen besteht und auch die Wahrscheinlichkeit der Fehler steigt.

3. 2. 2. 2 Object-file Modell

Dieses Modell geht auf Studien von Kahneman & Treisman zurück (z.B. Kahneman & Treisman, 1984; Treisman, 1988; Kahneman, Treisman, & Gibbs, 1992). Die Probleme, die dieses Modell lösen soll, entsprechen weitgehend den schon angesprochenen der Objektindividuation und Objektidentität. Wie wird die Identität eines Objektes aufrechterhalten, obwohl es sich verändert oder bewegt oder sich der Beobachter bewegt? Eine weitere Grundlage dieses Modells sind Wiederholungs- oder Priming-Effekte: Die Identifikation eines Stimulus wird erleichtert, wenn dieser Stimulus zu einem vorher im gleichen Kontext gezeigten Stimulus (dem Prime) passt. Kahneman et al. (1992) gehen von dem theoretischen Konzept aus, dass perzeptuelle Objekte die wesentlichen Einheiten der Informationsverarbeitung sind und dass der Kontext, innerhalb dessen die Verarbeitung stattfindet, häufig von dem Stimulus selbst aktiviert wird.

Eine zentrale Frage, die beantwortet werden soll, ist die erlebte Kontinuität eines sich verändernden Objektes. Kahneman et al. geben folgendes Beispiel: Man stelle sich vor, dass sich einem eine fremde Person auf der Straße nähert. Kurz bevor man auf gleicher Augenhöhe ist, grüßt diese Person, die plötzlich als guter Bekannter erkannt wird, den man nicht in diesem Kontext erwartet hätte. Während der ganzen Episode der Annäherung bestand kein Zweifel, dass sich jemand näherte. Diese Erscheinung behielt ihre Identität als eine sich nähernde, sich bewegende Person, obwohl sich ihre retinale Größe, ihr Umriss sowie ihre Benennbarkeit veränderte (z.B. von “unbekannte männliche Person” zu “Harry Lime”). Objekte werden in der Wahrnehmung eher durch raum-zeitliche Beschränkungen als durch sensorische Eigenschaften oder Namen definiert. Die Kontinuität der Objektidentität kann trotz markanter Veränderungen des visuellen Stromes immer wieder hergestellt werden, auch wenn die Person beispielsweise kurzzeitig durch eine Litfasssäule verdeckt wird. Ähnliches trifft für die Diskontinuitäten des visuellen Stromes zu, die durch Augenbewegungen entstehen. Das Objekt, das ich wieder fixiere, nachdem ich kurzzeitig ein anderes betrachtete, muss vom visuellen System wieder als dasselbe Objekt erkannt werden können. In diesem Zusammenhang tauchen wieder zwei Bedeutungen von Identität auf: Zum einen die Identität eines Objektes, das durch Benennung mit einem Eigennamen identifiziert wird. Die sich annähernde Person hatte nicht die selbe Identität, als sie sich als Fremder näherte und durch das Erkennen als Bekannter wechselte sie die Identität, da bestimmte Wahrnehmungsmerkmale mit bestimmten Gedächtnismerkmalen

übereinstimmen. Andererseits behielt die Person als als Wahrnehmungseinheit ihre Identität im dem Sinne, als sie kontinuierlich das selbe Wahrnehmungsobjekt blieb.

Hier sind zwei Aspekte der Wahrnehmung auseinander zu halten, die sich als “Sehen eines Objektes” versus “Erkennen eines Objektes” kennzeichnen lassen. Etwas als bestimmtes zu erkennen, setzt etwas als Gegebenes voraus. Die weitere Bestimmung dieses Etwas als ein bestimmtes Ding erfolgt durch die Verknüpfung mit Gedächtniseinträgen. Diese Verknüpfung kann passiv im Sinne einer Einordnung in ein Schema erfolgen oder aktiv durch den Auf- oder Umbau eines Schemas. Das Identifizieren eines Objektes ist vom Identifizieren eines speziellen Objektes zu unterscheiden. In dieser Hinsicht ist das Wahrnehmen (wieder-) erkennendes Identifizieren eines Objektes: Ein Reiz A wird im Sehsystem beispielsweise als A' repräsentiert, die Reizrepräsentation A' löst die Aktivierung einer Gedächtnisrepräsentation (“Adresse”) aus. Passt eine Gedächtnisrepräsentation B' zur Reizrepräsentation A', dann gilt A als erkannt. Wichtig an dieser Sichtweise des Erkennens als Wiedererkennen ist, dass sie durch das Prinzip der Kontiguität unzureichend erklärt wird. Dieses Problem ist als Höffdings Problem bekannt: Wenn A' durch Kontiguität B' hervorrufen soll, dann setzt das die Bildung von A' durch A voraus, sodass die Verbindung des Sinneseindrucks A' mit der Erinnerungsvorstellung B' das Assoziationsprinzip der Ähnlichkeit voraussetzt (vgl. Prinz, 1983). In den Termini Piagets ist dieses Wiedererkennen eine Assimilation, deren Genese ein zentraler Bestandteil seiner epistemologischen Theorie ist. Piaget zufolge kann Erkennen nicht mit Assimilation gleichgesetzt werden, da es Fälle gibt, in denen A zu keinem Gedächtniseintrag passt, sondern ein solcher erst hergestellt werden muss, was Piaget als Akkommodation bezeichnete. Kahneman et al. (1992) bezeichnen derartiges assimilatives Erkennen als “display-board model of perception”: Ein Objekt löst eine Sequenz der Aktivierung mehrerer Knoten im Langzeitgedächtnis aus, welche einer Arbeitsabläufe kontrollierenden Schalttafel vergleichbare Muster bilden. Dieses Modell ist nach Kahneman et al. jedoch nicht geeignet, die perzeptive Identität eines Objektes verständlich zu machen. Es wird der Unterscheidung zwischen Sehen und Identifizieren nicht gerecht, da man sich bewegende Objekte sehen kann, auch wenn sie nicht identifizierbar sind oder falsch identifiziert werden. Kahneman et al. übernehmen die Ansicht, dass der visuelle Strom vor einem relativ undifferenzierten Hintergrund in distinkte perzeptive Objekte zerlegt wird. Das Endprodukt der visuellen Verarbeitung einer stationären Szene sind object files, also gewissermaßen Ordner, die Informationen über ein gewisses Objekt der Szene beinhalten. Es handelt sich um eine Art Zwischenablage, deren Zugänglichkeit über die Lokation des Objektes und nicht über sonstige Merkmale oder gar Benennungen gesteuert wird. Den Charakter dieser Informationen in der Objektzwischenablage präzisieren Kahneman et al. nicht, aber sie meinen sensorische Informationen, die sensorische Primitive, Objektmorpheme oder gar Objekte umfassen können. Sie gehen von hierarchisch-rekursiven Gruppierungsprozessen aus, die eine Szene so gliedern, dass mehrere top-down beeinflussbare Auflösungsebenen möglich sind. Die Zwischenablage kann auch automatisch bottom-up durch Gruppierungsprozesse angesteuert und belegt werden, sodass die Plazierung der Zwischenablage in der Informationsverarbeitungssequenz derjenigen des FINST-Mechanismus gleicht. Die Zwischenablage wird immer dann erneuert, wenn sich die sensorische Situation ändert, und bleibt so lange geöffnet, wie das Objekt im Sehfeld ist.

Die Zwischenablage dient dazu, Diskontinuitäten im Sehfeld, bedingt durch temporäre Okklusion oder Sakkaden, zu überbrücken, indem die momentane Information mit der in der Zwischenablage

unmittelbar zuvor abgelegten Information verglichen wird. Jede neuerliche Wahrnehmung eines Objektes führt also dazu, dass es einen Rück-Vergleich mit den Zuständen vorher gibt. Sind diese beiden Zustände hinreichend ähnlich, wird das Objekt als kontinuierlich interpretiert. Sind die beiden Zustände unähnlich, dann wird die Zwischenablage gelöscht und eine neue angelegt, die dann das neue Objekt repräsentiert. Im wesentlichen werden drei Operationen benötigt, um die perzeptive Kontinuität im visuellen Strom festzustellen: (1) Eine Korrespondenzoperation, die zu prüfen hat, ob eine Objektrepräsentation A' einem neuen Objekt B entspricht oder ob es sich um das unmittelbar zuvor verarbeitete Objekt A handelt, das sich an einen anderen Ort hinbewegt hat. (2) Ein Rückvergleichsprozess, der Merkmale des gerade nicht sichtbaren Objektes wieder aktualisiert. (3) Eine Art Ergänzungs- oder Interpolationsprozess, der die momentane und die unmittelbar vorhergehende Informationen so verbindet, dass ein sinnvolles Perzept der Bewegung oder Veränderung entsteht, wenn beispielsweise die Bewegungsbahn eines oder mehrerer Objekte im Raume verfolgt wird (Shepard, 1984). Die Zwischenablagen sind wesentliche Abschnitte der zeitlichen und räumlichen Integration visueller Informationen zu dynamischen Perzepten. Kahneman et al. verweisen entsprechend auf Phänomene der Wahrnehmung von Scheinbewegungen, wie den Ternus- oder den Tunnel-Effekt. Die Bewegung eines kontinuierlichen Objekts kann vom visuellen System erst nach Eintreffen der Information über einen zweiten Stimulus konstruiert werden, dessen Merkmale mit denjenigen des ersten Stimulus verglichen werden müssen. Entsprechend basieren die empirischen Studien von Kahneman und Mitarbeiterinnen auf einem objektspezifischen preview-Effekt, der über die Analyse von Benennungslatenzen eines Objektes ermittelt wird: Ein neu auftauchendes Objekt wird schneller benannt, wenn es physikalisch zu einem vorher gesehenen Objekt passt, das Teil des neuen Objektes ist. Die Variation weiterer Objektmerkmale und Aufgabenparameter durch z.B. die Verwendung von Hinweisreizen erbrachten stets einen Verarbeitungsvorteil für die gleichen Objekte.

Nur wenige Zwischenablagen können gleichzeitig bearbeitet werden, was die Auflösbarkeit der visuellen Szene wesentlich beeinflusst. Befindet man sich auf der Ebene von Gruppen, können Details der Objekte nur ungenügend verarbeitet werden, auf der Ebene von Objekten die Objektmorpheme und die Gruppen, usw. Bestätigt wurde, dass es bei zwei Objekten noch den objektspezifischen Verarbeitungsvorteil gibt, der aber mit zunehmender Anzahl zurückgeht und bei vier Objekten zu verschwinden scheint. Dass das Ablegen von Objektmerkmalen in einer Zwischenablage zum nächsten Verarbeitungszeitpunkt einen Verarbeitungsvorteil für das neue Objekt im Sinne des Einsparens von zeitlichen Ressourcen bringt ('object-specific preview benefit'), bringen Kahneman et al. mit drei Charakteristiken in Verbindung: das Nachsehen operiert zeitlich rückwärts, auf nur ein Objekt bezogen und wird durch Objektmerkmale gesteuert, die die Einheit und Kontinuität des Objekts sichern, wobei Form, Farbe und semantische Aspekte keine Rolle spielen. Daher spielen diese temporären Register eine zentrale Rolle bei der transsakkadischen Informationsintegration.

Kahneman et al. sehen das FINST-Modell von Pylyshyn in engem Zusammenhang mit ihrem Modell, da es in beiden Modellen um den Aufbau früher und elementarer visueller Repräsentationen geht, aus denen komplexere Einheiten konstruiert werden können. Ihrer Sicht nach werden durch FINST diejenigen raumzeitlichen Informationen bereitgestellt, die in die Zwischenablage kopiert werden und dort als Adresse dienen können. Allerdings sollen die Zwischenablagen erheblich mehr Informationen enthalten als die FINSTs bereitstellen, sodass FINST eine frühe Phase einer Zwischenablage darstellt; insbesondere können die Relationen zwischen den indizierten Teilen eines

Objektes nicht durch ein FINST allein gebildet werden. Insofern sehen Kahneman et al. im FINST-Modell nur eine Teillösung des Bindungs-Problems, das sie mit ihrem Modell für besser gelöst halten. Allerdings sind die Unterschiede zwischen beiden Modellen nicht so groß wie Kahneman et al. meinen, denn beide postulieren vergleichbare Operationen. Es unterscheiden sich nur die experimentellen Paradigmen, die zur Stützung der jeweiligen Modelle herangezogen werden: Kahneman et al. verwenden Paradigmen, die den Priming- und Matching-Techniken gleichen und deren kurze zeitlichen Intervalle zwischen Prime und Stimulus Scheinbewegungen induzieren, wohingegen Pylyshyn und Mitarbeiterinnen eher Tracking-Techniken verwenden.

3. 2. 2. 3 Numeron - Modell

Das Numeron-Modell stammt von Gelman und Gallistel (1978) und wurde bereits in Kap. 2.8 im Zusammenhang mit den Zählprinzipien dargestellt. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass Numerons mentale Repräsentate sind, welche wie distinkte Marken eindeutig einzelnen, zu zählenden Objekten zugeordnet werden können. Diese distinkten mentalen Zustände sind also symbolischer Natur, wobei die Numeralia eine Unterklasse der Numerons sind. Ein non- oder präverbales Lebewesen, das beispielsweise drei Bälle aufzählt, kann dem ersten Ball “@”, dem zweiten Ball “#” und dem dritten Ball “\$” zuordnen. Das letzte Numeron “\$” repräsentiert die Numerosität “3”, wobei sich Gelman und Gallistel (1978) nicht über Mechanismen der Repräsentation äußern. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass Gelman und Gallistel (1978) die Numerons im Sinne der Numeralia interpretieren. Das Numeron-Modell garantiert zwar die Konstanz einer Zählzeichenabfolge, aber eine konstante Zählzeichenreihe allein ist nicht hinreichend, um die Kardinalität einer Menge zu bestimmen. Ohne Bedeutungsfestlegung sind non-analoge Marken nicht geeignet, Ordnungsrelationen abzubilden, was eine Voraussetzung für die Kardinalitätsbestimmung wäre. Mit anderen Worten: Das Numeron-Modell konstituiert eine Nominal-Skala, in der die Numerons als Nummern fungieren, die Numerositäten als abstrakte Kategorien kennzeichnen, z.B. durch “@” die Kategorie “1”. Obwohl Gelman & Gallistel nie explizit auf dieses Problem eingehen, verbinden sie in späteren Publikationen (Gallistel & Gelman, 1992; Gallistel & Gelman, 1991; Gallistel, 1990) das Numeron- mit einem analogen Repräsentationsmodell, dem Akkumulator-Modell, das ordinale und kardinale Zahlaspekte darzustellen gestattet. Die nonverbalen Numerons sind nicht geeignet, das Phänomen Subitizing zu erklären, sondern wären erst dann zu einer Erklärung geeignet, wenn sie mit einem Ordnungsrelationen repräsentierenden Zählmechanismus verbunden werden.

3. 2. 2. 4 Akkumulatormodell

Gallistel und Gelman interpretierten in mehreren Arbeiten (Gallistel & Gelman, 1991, 1992; Gallistel, 1990) die nominalen präverbalen Numerons als analoge Repräsentate von Größen wie räumlichen oder zeitlichen Längen. Diese analogen mentalen Größen sollen von einem besonderen Zählmechanismus generiert werden, den Meck & Church (1983) vorschlugen. Gallistel & Gelman (1992) weisen darauf hin, dass unsere üblichen numerischen Symbole, die Zahlworte und Ziffern, arbiträr mit ihren Referenten verbunden sind. Der Umgang mit arabischen Zahlworten sei “digital computation”, es gäbe auch Symbole aus dem Bereich der “analog computation”, wie Stromstärke oder

Spannung, durch die arithmetische Operationen durch physikalische Prozesse realisiert werden können. Diese Argumentation zielt auf physikalische Prozesse, die zum analogen Messen und Rechnen geeignet sind, und somit eine nicht-digitale Interpretation der Numerons erlauben, denn die Frage nach dem Repräsentationsformat bzw. repräsentationalen Mechanismus war bis zur Arbeit von Gallistel (1990) nicht beantwortet worden. Des Weiteren soll es dadurch möglich werden, die Numerons nicht nur zum Nummerieren, sondern auch zur Repräsentation ordinaler und kardinaler Zahlenaspekte zu verwenden. In diesem Zusammenhang führen Gallistel & Gelman (1992) auch das Beispiel der Histogramm-Arithmetik oder des Histogramm-Rechners ("histogrammic calculator") ein. Für die Funktionsweise des Histogramm-Rechners trifft das in Kap. 2.3 über den Operatoraspekt der Zahlen Gesagte zu. Mit Hilfe einer kontinuierlichen Größe wie der Länge einer Histogrammsäule lassen sich Numerositäten sowie Operationen damit wie die Addition repräsentieren, die isomorph zu arithmetischen Gesetzmäßigkeiten sind. Gallistel & Gelman (1992) schlagen auf diesen Überlegungen aufbauend vor, dass es analoge Symbolverarbeitungsprozesse gäbe, die den non- bzw. präverbalen Prozessen der Repräsentation und Operation mit Numerositäten bei Tieren und bei Menschen zugrunde liegen. Die solcherart analog repräsentierten Numerons sind letztlich neurophysiologisch realisiert.

Wie ist der Zählmechanismus beschaffen, der die präverbalen analogen Numerons generieren soll? Gallistel & Gelman (1991, 1992) beziehen sich auf eine tierpsychologische Arbeit von Meck & Church (1983). Die Größe eines Numerons, die durch einen Punkt auf einem mentalen Zahlenstrahl repräsentiert und durch den Zählmechanismus generiert wird, variiert auch wenn die selbe Numerosität wiederholt gezählt wird. Die Werte dieser Numerons bilden eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion auf dem mentalen Zahlenstrahl, deren Varianz, angeblich in Übereinstimmung mit dem Zählermodell und experimentellen tierpsychologischen Befunden, eine skalare Funktion der Numerosität ist: Je größer die Numerosität ist, desto größer ist die Varianz der Numerons und folglich die Wahrscheinlichkeit, eine Numerosität mit ihren benachbarten Numerositäten zu verwechseln. Es ist genau diese skalare Eigenschaft des Zählmechanismus, die ihn als Modell für Subitizing geeignet erscheinen lässt. Gallistel & Gelman (1991) sehen in den Ansätzen anderer Autoren keine Erklärung des Subitizing-Phänomens. Allerdings nehmen sie nicht auf die Forschungsarbeiten aus dem Bereich der frühen visuellen Informationsverarbeitung Bezug, die das FINST- und das Object file-Modell als Erklärungsansätze verwenden. Gallistel & Gelman (1991, 1992) diskutieren im wesentlichen die Frage der Diskontinuität der Reaktionszeit- und Genauigkeitsdaten, die mehrere, aber nicht alle Autoren gefunden haben (z.B. Mandler & Shebo, 1982). Im Gegensatz zu Trick & Pylyshyn (1994a) gehen Gallistel & Gelman (1991, 1992) nur sehr oberflächlich auf die methodischen Unterschiede bei der Erforschung des Subitizing ein. Die einzige Unterscheidung, die ihnen diskussionswürdig erscheint, ist die zwischen tachistoskopisch dargebotenen Numerositäten mit fixen bzw. variablen durch die V_{pn} bestimmten Darbietungsdauern. Sie heben hervor, dass Studien mit fixer Darbietungsdauer im Gegensatz zu Reaktionszeitstudien, welche einen linearen Anstieg der RT aufwiesen, einen nicht-linearen Anstieg begünstigen würden. Sie gehen dennoch davon aus, dass der Prozess der Zuweisung von Numerons zur Numerositäten unabhängig von der Darbietungsart ist. Die SOA- (Stimulus-Onset-Asynchry) oder die Maskierungstechnik berücksichtigen sie zwar nicht, aber sie halten die Diskontinuitäten der Steigung der Numerosität-Reaktionszeit- bzw. Numerosität-

Genauigkeitsfunktion für Artefakte. Was jedoch erklärungsbedürftig bleibt, ist die (lineare) Abnahme der Enumerationsgenauigkeit bei steigenden Numerositäten im Bereich kleiner Anzahlen.

Exkurs: Enumeration im Tierversuch als Basis des präverbalen Zählmodelles

Gallistel & Gelman (1991, 1992) verweisen auf Studien, denen zufolge Tiere Numerositäten diskriminieren können, wobei die Stimuli sowie zeitliche und räumliche Verhältnisse variiert worden waren (Capaldi & Miller, 1988; Davis & Pérusse, 1988). Gallistel & Gelman (1991) zufolge ist es zweckmäßig, einen seriell geordnete Zustände abarbeitenden Mechanismus anzunehmen, dessen letzter Zustand die Kardinalität einer Numerosität repräsentieren kann. Diskriminationsstudien mit Tieren zur Numerosität verwenden entweder die Anzahl von Reaktionen seit der letzten Verstärkung oder die Anzahl von Elementen eines Displays, die sowohl simultan als auch sequentiell dargeboten werden können. In einer Studie von Mechner (1958) mussten Ratten lernen, einen Hebel A in einer bestimmten Häufigkeit zu betätigen und dann zu einem Hebel B zu wechseln, um ihr Futter zu erhalten. Wicht die Häufigkeit, mit der A gedrückt wurde, von der Zielhäufigkeit ab, wurde die Ratte bestraft. Die Wahrscheinlichkeit, von A nach B zu wechseln, war normal verteilt um eine Anzahl von Hebeldruckreaktionen, die etwas größer war als die geforderte Anzahl, wobei die Differenz zur geforderten Anzahl eine systematische Funktion der Bestrafung war. Eine etwas andere Versuchstechnik verwandten Platt & Johnson (1971), die zu vergleichbaren Ergebnissen führte: Der Median der Hebeldruckanzahl nahm linear mit der geforderten Anzahl zu. Die Wahrscheinlichkeit, die geforderte Numerosität mit benachbarten Numerositäten zu verwechseln, war aber selbst bei so kleinen Numerositäten wie 4 nicht vernachlässigbar. Vielmehr nahm die Varianz der Numerositätsschätzung proportional zur geforderten Numerosität zu. Dieses Verhältnis entspricht dem Weberschen Gesetz: Je größer die geforderte Numerosität, desto ungenauer unterschieden die Ratten diese von den benachbarten Numerositäten. In diesem Zusammenhang verweisen Gallistel & Gelman (1992) auf die große Ähnlichkeit der Numerosität- und der Größendiskrimination, welche vor allem durch die Arbeit von Meck & Church (1983) illustriert wird. Sie trainierten Diskriminationsverhalten von Ratten bezogen auf die Anzahl der Elemente einer Menge oder die Dauer einer Sequenz von Elementen. Die Trainingssequenz A dauert 2sec und bestand aus zwei alternierenden Folgen von weißem Rauschen (0.5sec) und Stille (0.5sec). Eine Trainingssequenz B dauerte 8sec und bestand aus acht dieser Folgen. Nach jeder Trainingssequenz erschienen 2 Hebel, wobei nach der Sequenz A der 2er-Hebel richtig war, nach der Sequenz B der 8er-Hebel. Ein falscher Hebeldruck wurde nie, der richtige in 50% der Fälle verstärkt. Nachdem das Training die Leistungsasymptote erreichte, wurden zwei neue Serien in das Training eingeführt: In der Serie C wurde die Dauer konstant auf 4sec gesetzt, wobei die Anzahl der Zyklen zwischen 2 und 8 variierte. In der Serie D wurde die Anzahl der Zyklen konstant auf 4 gesetzt, wobei die Dauer der Sequenz zwischen 2 und 8sec variiert wurde. Sowohl in der Serie C als auch in der Serie D wurde als AV die Wahrscheinlichkeit, den 8er-Hebel zu drücken, als Kriterium verwendet. Hinsichtlich der Diskrimination der Dauer und derjenigen der Numerosität ergab sich kein Unterschied. Der Punkt, an dem sich die Ratten nicht zwischen 2 und 8 entscheiden konnten, war 4, das geometrische Mittel. Dies legt nahe, dass Dauer und Anzahl in gleicher Weise repräsentiert werden und durch ein einheitliches Modell beschreibbar sind. Gallistel (1990) verweist

auf zahlreiche Studien, denen zufolge Dauer und Anzahl saliente Aspekte von Stimuluskonfigurationen sind, die häufig unabhängig von den sensorischen Attributen der Stimuli wahrgenommen werden.

3. 3 Subitizing und präverbales Zählen

3. 3. 1 Das Akkumulator-Modell als präverbales Zählmodell

Die Tatsache, dass die Diskrimination von Numerositäten und die von Dauern bei Ratten mit der gleichen psychophysischen Funktion beschrieben werden können, erklären Meck & Church (1983) durch die Annahme einer mentalen Größe, die sowohl Numerositäten als auch Dauern analog zur Länge einer Histogrammsäule repräsentiert. Diese mentale Größe weist eine skalare Varianzeigenschaft auf. Die Standardabweichung mentaler Größen, die entweder eine Numerosität oder eine Dauer repräsentieren, wächst proportional zum Anstieg des arithmetischen Mittels. Meck & Church (1983) schlagen einen Mechanismus vor, der die mentalen Größen mit Numerositäten (oder Dauern) verbindet. Es gibt einen Pulsgenerator ('pacemaker'), der mit relativ konstanter Frequenz Impulse erzeugt. Diese Impulssequenz läuft in eine Schalteinheit ('switch'), welche offen oder geschlossen sein kann. Durch deren Öffnen oder Schließen wird eine Kodierung von Zeitintervallen und Ereignissen, aber auch von Objekten möglich, wenn man davon ausgeht, dass ein Ereignis gleichbedeutend mit dem Auftreten und Verschwinden eines Objektes in einem sehr kurzen Zeitintervall ist. Dauert dieses Ereignis oder diese Ereignissequenz relativ lange, dann ist es ein Objekt, da man sich ein Objekt als eine verbundene Sequenz von räumlich kohärent verteilten Ereignissen vorstellen kann. Derartige Überlegungen zur zeitlich-räumlichen Ereignis- bzw. Objektbindung werden von Meck & Church (1983) oder von Gallistel & Gelman (1991, 1992) nur skizzenhaft angestellt. Am Beispiel einer Zeitdauerschätzung wird deutlich, dass Gallistel & Gelman (1991, 1992) angelehnt an das Zeitdauerschätzmodell von Gibbon (1977), eine Impulssequenzkodierung meinen: Am Beginn des zu schätzenden Zeitintervalls schließt sich der Schalter, sodass ein Strom von Impulsen in einen Akkumulator einlaufen kann. Des weiteren ist ein Mechanismus vonnöten, der die Impulse oder Impulssequenzen integriert und zu einer Größe verrechnet, am einfachsten durch Summenbildung. Dieser Mechanismus ist der Akkumulator. Am Ende des Zeitintervalls wird der Schalter wieder geöffnet und die Summe des Akkumulators wird mit einer Konstanten multipliziert, die im Mittel den Betrag 1 hat. Dieses Pulsgenerator-Schalter-Akkumulator-System wird von Meck & Church (1983) als Einheit im Sinne einer Stopp-Uhr oder eines Zählers verstanden. Der Impulsgenerator kann wie eine Uhr funktionieren, da die Impulse eine fixe Frequenz haben. Dieser Betrag wird in das Arbeitsgedächtnis eingelesen und kann zum Vergleich nachfolgender Zeitintervalle herangezogen werden. Auch der Vergleich mit einem längerfristigen Referenzgedächtnis, mit z.B. dem Repräsentat des Zielfüllungszustandes des Akkumulators, ist möglich, wobei dann noch eine Komparatoreinheit nötig ist. Damit der ganze Mechanismus wie ein Zähler funktionieren kann, muss er Meck & Church (1983) zufolge im Ereignismodus arbeiten können: Jedes sequentiell auftretende Ereignis oder Merkmal in einer simultan präsentierten Objektkonfiguration kann zum Schließen des Schalters für eine fixe Dauer führen. Der Wert des Akkumulators wird durch eine Sequenz solcher "Kurzschlüsse" um einen bestimmten Betrag pro "Kurzschluss" inkrementiert. Der Endstand des Akkumulators entspricht der Anzahl der "Kurzschlüsse". Der Endstand des Akkumulator kann kontinuierliche

Größen wie Länge oder Dauer repräsentieren und ist daher dem operativen Zahlenaspekt isomorph. Die Zustände des Akkumulators entsprechen den Numerons. Das Eins-zu-Eins-Zählprinzip wird dadurch realisiert, dass die Schalteinheit nur eine bestimmte Impulssequenz in den Akkumulator lässt, sodass jedem neu inkrementierten Zustand des Akkumulators eine gezählte Entität entspricht. Die Zustände des Akkumulators sind genauso geordnet wie andere Quantitäten, z.B. Länge oder Dauern und können somit die Ordnungsrelationen in Numerositäten repräsentieren. Dieser Mechanismus realisiert also den operativen Zahlenaspekt in vergleichbarer Weise wie Quantitäten. Der Endzustand des Akkumulators repräsentiert nicht nur die Eigenschaft des letzten Ereignisses, sondern eine Eigenschaft der gesamten Serie, deren Kardinalität. Insofern sehen Gallistel & Gelman (1991, 1992) in diesem Akkumulator-Modell diejenigen Prozesse abgebildet, die in Übereinstimmung mit ihren Zählprinzipien stehen.

Im Gegensatz zu dem FINST- und Object-file- Modell werden aber keinerlei Annahmen über die Segmentations- und Bindungsprozesse gemacht, die jedoch Voraussetzung für das Zählen sind. Sie machen keine Aussagen darüber, durch welche Signale der Akkumulatormechanismus gestartet wird. Was gezählt wird, ist dem Akkumulator schon in der Weise zugänglich, dass es über das Prinzip der Impulskodierung erfasst werden kann. Dieses Prinzip stammt aus der Neurophysiologie: Frequenz und Dauer der Aktionspotentiale einer Nervenzelle kodieren die Auslöseenergie, wobei die Schalteinheit in der Selektivität der synaptischen Verbindungen und der Akkumulator durch inhibitorische Verknüpfungen in einem Nervennetz nach dem Prinzip der lateralen Inhibition realisiert sein könnte. Dehaene & Changeux (1993) bauten ein neuronales Netzwerk zur Erfassung von Numerositäten, das einen ähnlichen Output wie das Akkumulatormodell produzierte. Aber auch in diesem Modell ist die Art der zu zählenden Einheiten unwesentlich für die Modellbildung. Auch das Problem der Gleichsetzung von Objekt und Ereignis hängt damit zusammen. Dies mag damit zu tun haben, dass das Akkumulatormodell entwickelt wurde, um die Diskrimination akustischer Stimuli im Tierversuch zu erklären, wohingegen das FINST- und das Object-file-Modell im Bereich visueller Stimuli entwickelt wurden. Meck & Church (1983) verwendeten Töne und Pausen gleicher Dauer, die sich zyklisch abwechselten. Diese Stimuli passen gut zur Vorstellung eines sich synchron dazu öffnenden und schließenden Schalters, fraglich ist jedoch, ob sich dieser Mechanismus auf das Zählen visueller Objekte übertragen lässt. Dem Akkumulatormodell fehlt ein Selektionsmechanismus und die Anbindungen dieses Mechanismus an top-down Prozesse der Aufmerksamkeitssteuerung sind unklar. Beim Enumerieren akustischer Ereignisse stehen die zeitlichen Aspekte des Stimulus im Vordergrund, beim sequentiellen visuellen Abtasten hingegen sind auch die räumliche Selektion und Partitionierung bereits abgetasteter und noch nicht markierter Objekte zu berücksichtigen.

Definiert man ein Ereignis als sehr kurze Folge von Veränderungen mit on-off-Charakteristik, dann können auch räumliche Entitäten Ereignischarakter haben, wenn sie nur kurzzeitig beachtet oder dargeboten werden. Im akustischen Bereich wäre ein Analogon ein langandauernder Ton. Gemeinsam mit den Überlegungen, dass das Akkumulatormodell auf einer Frequenzkodierung beruht, erscheint die Übertragbarkeit auf Objekte plausibel. Solange ein Objekt im Aufmerksamkeitsfokus steht, werden Impulse durch die Schalteinheit gelassen, die beim Wechsel der Aufmerksamkeit auf ein anderes Objekt unterbrochen werden. Da aber das Akkumulatormodell von einer Proportionalität von Dauer und Numerosität ausgeht, wird die visuelle Enumeration problematisch, wenn sich die Aufmerksamkeit sehr ungleich verteilt. Der Akkumulator kann nicht diskriminieren, ob drei Objekte mit der

Aufmerksamkeitsdauer “eins” oder nur ein Objekt mit der Aufmerksamkeitsdauer “drei” erfasst wurde. Der Endzustand des Akkumulators kann daher nicht die Eigenschaft einer Serie repräsentieren, da aus dem Füllungszustand nicht mehr die einzelnen Mengen identifiziert werden können. Die Dauer der Integration eines räumlichen Elements müsste unabhängig vom räumlichen Element akkumuliert werden. Um dieses Problem zu beseitigen, müsste bei der Akkumulation von Impulsen die Anzahl der Schalterstellungsveränderungen mitverrechnet werden, was auf das interessante Problem verweist, ob Raumelemente ausschließlich durch Zeitelemente individuiert werden können (Strawson, 1959). Möglicherweise sind Gallistel und Gelman nicht auf dieses Problem gestoßen, weil sie von einer deutlichen Varianz der Impulsrate ausgehen: Angenommen, die Schalteinheit sei immer für eine konstante Dauer geschlossen und die Anzahl der Impulse wäre poissonverteilt, dann würde die Rate von Schalterschluss zu Schalterschluss variieren. Dies wäre neben Enumerationsfehlern eine weitere Quelle für die skalare Varianz, da die Verknüpfung zwischen Numerosität und mentaler Größe auf jeden Fall variierten. Das Akkumulatormodell kann aufgrund der Integrationsweise des Akkumulators den kardinalen Zahlenaspekt nicht abbilden, allenfalls den ordinalen des mehr oder weniger.

3. 3. 2. Akkumulatormodell und Subitizing

Da Gallistel & Gelman (1991, 1992) das Akkumulatormodell als präverbale Zählmechanismus verstehen, erklären sie auch das Phänomen des Subitizing damit, dass es durch diesen präverbale Zählmechanismus generiert wird. Das liegt aber nicht daran, dass dieser Mechanismus non-verbal ist, sondern dass der präverbale Zähler deutlich schneller als die verbale Zählroutine abläuft. Die numerosität-repräsentierende Größe, das präverbale Numeron, wird lange vor der Aktualisierung des korrekten Numerlogs generiert, weswegen man durch die Anwendung des präverbale Zählmechanismus, dem Subitizing nach Gallistel & Gelman (1991), das präverbale Numeron nutzen kann, um das korrespondierende Numerlog abzurufen. Die Ursache, dass diese Strategie nur bis zu einer Numerosität von 4 zweckmäßig ist, liegt in der ungenauen Arbeitsweise des präverbale Zählers. Oberhalb von 4 ist die Fehlerwahrscheinlichkeit, die Numerosität mit der benachbarten zu verwechseln, schon soweit angestiegen, dass die meisten Versuchsteilnehmer auf das verbale Zählen vertrauen. Gallistel & Gelman (1991) heben hervor, dass das verbale und das non-verbale Zählen mit der Verletzung des Eins-zu-Eins-Prinzips eine Varianzquelle gemeinsam haben, was in einer fehlerhaften Anzahlbestimmung resultiert. Dies hängt auch mit der Fertigkeit der Partitionierung von gezählten und ungezählten Items zusammen. Da aber jedem Numeron eine Wahrscheinlichkeitsverteilung auf dem mentalen Zahlenstrahl entspricht, ergibt sich aus dieser Struktur eine gewisse Verwechslungswahrscheinlichkeit benachbarter Numerons, die mit fehlerhaften Zählstrategien nichts zu tun hat. Diese Varianz nennen Gallistel & Gelman (1991) inhärente Varianz. Sowohl die Varianz verursacht durch Fehlzählungen als auch die inhärente Varianz nehmen mit steigender Numerosität zu, wobei der Weber-Bruch der inhärenten Varianzquelle deutlich größer sein soll als derjenige der Fehlzählvarianzquelle.

3. 4 Experimentelle Identifikation des Subitizing

Nach Gallistel & Gelman (1991, 1992) ist das Phänomen Subitizing die Resultante eines präverbalen Zählprozesses. Die Diskontinuität in den Funktionen, die die Enumerationszeit oder die Enumerationsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Numerosität abbilden, kommen durch einen Strategiewechsel zustande. Ab einer Numerosität von ca. 4 Elementen wird das präverbale Zählen so fehleranfällig, dass zur Vermeidung von Fehlern auf das langsamere, verbale Zählen gewechselt werden muss. Die Notwendigkeit eines solchen strategischen Wechsels resultiert aus der inhärenten Varianz des präverbalen Zählprozesses. Die Diskontinuität der erwähnten psychometrischen Funktionen wird von Gallistel & Gelman (1991, 1992) jedoch aus der Perspektive des post-counting Subitizing gedeutet, denn Gallistel & Gelman zufolge kann sie nur bei Versuchsteilnehmern auftreten, die zählen können. In der Diskussion der ausgewählten Studien zum Nachweis von Subitizing bezweifeln Gallistel & Gelman (1991, 1992) jedoch die Nachweise der dort berichteten Diskontinuitäten. Insbesondere halten sie die mit Hilfe der "tachistoskopischen Methode" ermittelten Diskontinuitäten für ein Artefakt. Letztlich basiert ihr Ein-Prozess-Modell des Subitizing auf Daten aus Tierversuchen, in denen mit akustischen Stimuli gearbeitet wurde. Ihr präverbales Zählmodell übernimmt ein Zeitdauer-Diskriminationsmodell, das zur Diskrimination von analog repräsentierten Quantitäten und damit auch zur analogen Repräsentation von Mengen geeignet ist.

Das Alternativmodell betrachtet Subitizing nicht als Resultante eines präverbalen Zählmechanismus oder Quantitäts-Diskriminations-Mechanismus, sondern als Nebenprodukt des Objektbindungsprozesses, womit es zunächst auf die visuelle Domäne beschränkt bleibt. Trick & Pylyshyn (1994a) schlagen ein Modell des Subitizing im Bereich der visuellen Wahrnehmung vor, das Subitizing als Bestandteil der Hierarchie visueller Routinen modelliert, wie sie Ullman (1984) vorschlug. Trick & Pylyshyn (1994a) sehen in Subitizing einen Nebeneffekt ihres präattentiven, kapazitätsbeschränkten Mechanismus, FINST. Die Hauptfunktion von FINST besteht darin, entdeckte und vorgruppierte Merkmale zu indizieren und damit zu individuieren. Auf diese Weise können Instanzen der Aufmerksamkeit und höherstufige visuelle Routinen so auf diese vorverarbeitete Information angewandt werden, sodass Objekte erkannt werden. In diesem Modell sind Kapazitätsbeschränkungen eine Folge der Notwendigkeit, die computationalen Kosten zu minimieren, die mit dem dynamischen Verfolgen einer größeren Anzahl von Merkmalen verbunden sind (track keeping problem). Die maximal dynamisch verfolgbare Anzahl scheint vier zu sein. Demzufolge reflektiert Subitizing eine kapazitätsbeschränkte Verarbeitungsstufe im Prozess der Objektbindung, in dem ein Objekt aus einzelnen Merkmalen (z.B. Linien, Linienschnitte, Junktoren, Textone usw.) zusammengesetzt wird (binding). Es sollte sich infolgedessen um eine Konstante der visuellen Informationsverarbeitung handeln.

3. 4. 1 Interindividuelle Unterschiede

Wenn es sich beim Subitizing um eine Konstante der visuellen Informationsverarbeitung handelt, dann müssten interindividuelle Unterschiede in wesentlichen Artefakte des jeweiligen Aufgabentyps sein. Typischerweise basieren die meisten Studien zum Subitizing auf Reaktionslatenzen, welche eine Enumerationsrate von 50msec pro Element bis zu drei oder vier Elementen zeigten, die deutlichst mit

den ca. 300msec pro Element für größere Numerositäten kontrastieren. Innerhalb des Subitizing-Bereiches findet sich daher nur eine insignifikante Steigung der Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Numerosität, eine erheblich größere Steigung außerhalb dieses Bereiches. Subitizing als schneller Enumerationsprozess tritt dann auf, wenn perzeptuelle Referenzmarken an kleine Numerositäten gekoppelt werden können. Wenn die Anzahl der Elemente klein ist, kann jedes einzelne zu enumerierende Element durch ein Referenztoken markiert werden. Der Abruf eines Zahlennamens wird dadurch bewerkstelligt, dass ein Zahlennamen einem Referenztoken zugeordnet wird. Die Produktion der die Numerosität indizierenden Antwort, die im Abruf des dem Referenztoken zugeordneten Zahlennamens besteht, ist die einzige, das Subitizing limitierende Größe. Es ist sehr schwer, den Ort der Diskontinuität einer bilinearen Reaktionszeitfunktion reliabel zu bestimmen. Diese Schwierigkeit nimmt noch zu, wenn die Diskontinuität einer individuellen bilinearen Reaktionszeitfunktion reliabel bestimmt werden soll. Daher wird bezweifelt, dass die verfügbare Evidenz aus Reaktionszeitstudien als Beleg für die Bilinearität gegenüber einer kontinuierlichen kurvilinearen Verarbeitungszeitfunktion ausreicht. Balakrishnan und Ashby (1992) argumentieren, dass die Beschränkung des Subitizing auf vier Elemente durch die Wahl des statistischen Analyseverfahrens erklärt werden kann. Die Autoren führten eine Reihe von statistischen Verteilungsprüfungen durch, die auf mittleren Reaktionszeiten unterschiedlicher Numerositätsfunktionen basierten. Sie legen nahe, dass es einen kontinuierlichen Anstieg der Informationsverarbeitungsleistung beim Enumerieren von bis zu sechs Elementen gibt. Dass sie die Schwelle zwischen Subitizing und Zählen statistisch nicht sichern können, veranlasst sie zu dem Schluss, dass Subitizing kein eigenständiger Prozess und damit keine eigenständige numerische Fähigkeit sein kann. Allerdings wäre dies durchaus verträglich mit Gallistels & Gelmans Konzeption eines präverbale Zählmechanismus, die aber Balakrishnan & Ashby nicht erwähnen.

Die überzeugendste Evidenz für Subitizing als einem eigenständigen visuellen Prozess stammt aus Wahrnehmungsexperimenten, die bei ein bis vier Elementen keine Genauigkeitsdifferenz berichten, was einer "Null-Steigung" entspricht. Sagi und Julesz (1985a, b; 1987) präsentierten beispielsweise für 5 ms wenige Zielreize, horizontal und vertikal linierte Segmente, die zentral in ein Hintergrundmuster aus Distraktorreizen, (diagonale Liniensegmente, 45° von rechts unten nach links oben geneigt), eingebettet waren. Auf das Stimulmuster folgte eine 10msec lang präsentierte Maske, die aus unterschiedlich orientierten v-Elementen an der Stelle jedes Liniensegmentes des Stimulmusters bestand. Der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn der Präsentation des Reizmusters und dem Beginn der Präsentation der Maske wurde variiert (Stimulus Onset Asynchry, SOA).

Es wurden zwei Aufgaben realisiert: In der Zähltaufgabe hatten die Beobachter zu entscheiden, ob sie n oder $n+1$ Zielreize sahen. Die Beobachter waren vor jedem Block über die beiden möglichen Numerositäten orientiert, der Ort der Zielreize wurde variiert, beide Alternativen waren pro Durchgang gleichwahrscheinlich. In der Diskriminationsaufgabe hatten die Beobachter zu entscheiden, ob die Zielreize gleich, z.B. alle Zielreize horizontal, oder unterschiedlich waren, z.B. ein Zielreiz war vertikal. Die Realisationen "gleich" oder "ungleich" traten pro Durchgang gleichhäufig auf, der Ort der Zielreize variierte.

Die Anzahl unterschiedlich orientierter Liniensegmente wurde erheblich schneller entdeckt als vertikale oder horizontale Liniensegmente diskriminiert wurden. Bei derjenigen SOA, die einer Treffergenauigkeit von 95% entsprach, war kein Numerositätseffekt mehr festzustellen, was für die

Diskrimination zwischen gleich und ungleich orientierten Liniensegmenten nicht zutraf. Sagi und Julesz interpretieren ihre Befunde dahingehend, dass die Lokalisation von Elementen im Raum von einem präattentiven, parallel arbeitenden Teilsystem bewerkstelligt wird ("where-system"). Im Gegensatz dazu beruht die Diskrimination unterschiedlich orientierter Liniensegmente auf einem seriellen Absuchen der Orientierungsrichtungen ("what-system"). Bevor eine bestimmte Merkmalseigenschaft identifiziert wird ("was"), muss der Ort des zu bestimmenden Merkmals festgestellt werden ("wo"), (z.B. Sagi & Julesz, 1985b; Atkinson & Braddick, 1989). Für die Annahme, dass es sich um zwei unterschiedliche Teilsysteme des Sehens handelt, gibt es auch neuroanatomische Evidenzen (z.B. Trevarthen, 1968; Mishkin, Ungerleider, & Macko, 1983). Demzufolge wäre Subitizing das Resultat eines Mechanismus, der über eine anzahlmäßig begrenzte Markierung von Merkmalsstellen die Identifizierung der dort vorhandenen Merkmale ermöglicht. Dieser Mechanismus basiert auf dem Entdecken von Differenzen der lokalen Merkmalsdichte. Zählen dagegen setzt nicht nur die Individuierung von Merkmalsstellen, sondern auch die Individuierung von Merkmalen voraus, weil ein bereits gezähltes Element markiert und daher von den noch zu zählenden Elementen diskriminiert werden muss, ein Vorgang, der als serieller Prozess anzusehen ist.

Folk, Egeth und Kwak (1988) kritisierten die Methodik von Sagi und Julesz, vor allem, dass alle Durchgänge in Blöcken präsentiert worden waren. Ihre Befunde unterschieden sich von denjenigen, die Sagi und Julesz berichtet hatten: Jeder Zuwachs in der Numerosität führte zu einem Zuwachs in der Verarbeitungszeit. Allerdings sind diese Experimente nicht vollständig vergleichbar mit denjenigen, die Sagi und Julesz durchführten. Folk, Egeth und Kwak verwendeten in ihren beiden ersten Experimenten Reaktionszeiten als abhängige Variablen und realisierten in ihrem dritten Experiment einen einfachen Up-down-Algorithmus, um die Leistung der Beobachter bei ca. 70% korrekter Antworten einzuregulieren, indem sie die Darbietungszeit der Stimuli variierten.

Keine dieser Studien maß die gesamte psychometrische Funktion aus oder modellierte diese mathematisch. Bedeutsamer ist, dass alle Studien nur eine maximale Numerosität von vier Elementen realisierten, weswegen keine Information über die Grenze des Subitizing-Bereiches verfügbar ist. Darüber hinaus werden in den Studien von Sagi und Julesz (1985a, b; 1987) parallele und serielle Informationsverarbeitung bezogen auf den Numerositätseffekt durch zwei unterschiedliche Arten von Aufgaben differenziert. In der einen Aufgabe musste eine von zwei möglichen Numerositäten identifiziert werden, in der anderen Aufgabe erforderte die Diskriminierung der Orientierung von Liniensegmenten ein "gleich"-versus-"verschieden"-Urteil. Hinzu kam, dass der Sehwinkel, unter dem die Stimuli präsentiert wurden, eine extra-foveale Projektion ermöglichte, sodass möglicherweise zusätzliche Verarbeitungszeit benötigt wurde, um Unterschiede in der Merkmalsdichte zu entdecken. Die Evidenz für parallele Verarbeitung im Subitizing-Bereich ist also durchaus anfechtbar.

3. 4. 2 Stimulus- und reaktions-limitierte Prozesse

Ein zentrales Ziel der zu berichtenden Experimente besteht darin, Prozessdifferenzen innerhalb eines über 4 hinausgehenden Bereiches der Numerositätsdiskrimination zu untersuchen. Die angewendete Methode sollte auch psychometrische Funktionen auf der Ebene des Individuums einbeziehen können. Sie sollte weiterhin prüfen, ob es sich bei den mit der "tachistoskopischen

Methode" (Gallistel & Gelman, 1991) gefundenen Diskontinuitäten tatsächlich um Methodenartefakte handelt.

Ausgangspunkt dieser methodologischen Überlegungen ist die Unterscheidung der Klasse der stimulus-limitierten und der Klasse der reaktions-limitierten Informationsverarbeitung. Stimulus-limitierte Prozesse beziehen sich auf diejenige Information, die durch das Enkodieren eines physikalisch präsentierten Stimulus verfügbar wird. Als perzeptuelles Korrelat wird diese Information eine gewisse Zeit t nach Beginn der Stimuluspräsentation verfügbar, bleibt während der Darbietungszeit des Stimulus verfügbar und beginnt sofort zu zerfallen, wenn die Präsentation des Stimulus endet (Loftus, Duncan & Gehrig, 1992). Die Eigenschaften der verfügbaren Information hängen von den Charakteristiken des Stimulus ab. Nach der Beendigung der Stimuluspräsentation werden die extrahierten Informationen von Reaktionsprozessen übernommen und weiterverarbeitet. Deren Beschränkungen haben ihren Ursprung entweder außerhalb der Person, beispielsweise in der Instruktion, so schnell wie möglich zu reagieren, oder innerhalb der Person, z.B. in Form der Antworttendenzen oder Gedächtnisprozessen. Insofern umfassen die Reaktionszeiten immer stimulus-limitierte und reaktions-limitierte Prozesse und sind als Maße sensorischer Prozesse dementsprechend nur eingeschränkt interpretierbar. Darüber hinaus sind in Reaktionszeitexperimenten Stimuluscharakteristika wie die Darbietungszeit unter der Kontrolle des Beobachters. Da Subitizing ein Resultat der enkodierten Numerosität ist und die Enkodierung sowie deren Nutzung zur Entscheidung Zeit brauchen, sollte die Darbietungszeit variiert werden, um diejenige Zeit zu identifizieren, die zur Erzielung einer bestimmten Genauigkeit ausreicht. Daher wurde die Genauigkeit anstelle der Reaktionszeit als abhängige Variable verwendet.

Stimuluscharakteristiken können als physikalische Ressource aufgefasst werden, die einen bestimmten Informationsgehalt des perzeptuellen Korrelates bedingen. Die Manipulation der physikalischen Ressource ist eine Manipulation der Information, die dem Beobachter zur Verfügung steht. Bei einer systematischen Beziehung zwischen dem Informationsgehalt des Stimulus und der physikalischen Ressource, können Unterschiede in der Rate der Informationsgewinnung durch die Unterschiede in den entsprechenden physikalischen Ressourcen beschrieben werden. Der funktionale Zusammenhang zwischen physikalischen Ressourcen bzw. Stimulusenergien wie Präsentationszeit und der Genauigkeit der Reaktionen konstituiert einen Messraum, in welchem unterschiedliche Stimuli und Aufgaben, die in ihrer informationellen Komplexität variieren, vergleichbar gemacht und verglichen werden können. Aufgabeneigenschaften können dann über die physikalischen Ressourcen bestimmt werden, z.B. kann diejenige Präsentationszeit bestimmt werden, die nötig ist, um 75% Treffergenauigkeit zu erreichen. Die Methode der Zeit-Genauigkeits-Funktionen (ZGF) (Kliegl, Mayr und Krampe, 1994) ist eine Umsetzung dieser Überlegungen, wobei die Darbietungszeit als Operationalisierung der physikalischen Ressource verwendet wird. Wendet man diese Methodik auf Subitizing an, sind für Darbietungszeiten innerhalb des Subitizing-Bereiches keine bedeutsamen Unterschiede in den Treffergenauigkeiten zu erwarten. Außerhalb des Subitizing-Bereiches sollte mit jeder Numerosität mehr zusätzliche Präsentationszeit benötigt werden, um die gleiche Treffergenauigkeit zu erzielen.

Da mit der Methode der ZGF gearbeitet werden soll, reduziert sich auch das Problem der Probanden, Genauigkeit und Geschwindigkeit abgleichen zu müssen; des weiteren entfallen die Latenzzeiten der motorischen Reaktionsrealisierung. Da die Stimuli maskiert werden, da Probanden über die Numerositäten n und $n+1$ orientiert sind und entscheiden müssen, ob $n+1$ an erster oder

zweiter Stelle dargeboten wurde, wird auch das Problem der post-counting Subitizing-Studien reduziert, dass sich der Versuchsteilnehmer für einen Strategiewechsel zwischen Subitizing und Zählen entscheiden muss. Wenn eine Numerosität noch per Subitizing erfasst werden kann und die andere nicht mehr, dann braucht letztere nicht gezählt zu werden, sondern kann aus ersterer erschlossen werden. Können beide Numerositäten nicht mehr per Subitizing erfasst werden, dann muss gezählt werden, was eine längere Darbietungszeit erforderlich machen sollte.

3. 5 Experimente zum Subitizing

3. 5. 1 Experiment 1

Im Experiment 1 wurde die obere Grenze des Subitizing mit Hilfe der Methode der konstanten Stimuli gemessen. Im Rahmen einer two-interval forced-choice Aufgabe (2IFC) hatte der Beobachter n von $n+1$ Zufallspunkte zu unterscheiden, wobei n 0 bis 6 Punkte für jeweils 15 Darbietungszeiten umfasste. Jedes Stimuluspaar wurde 48 mal präsentiert. Daraus resultierten 7 Zeit-Genauigkeits-Funktionen (ZGFs), die die Darbietungszeit t und die Genauigkeit p miteinander in Beziehung setzen und die nach folgender Exponentialfunktion modelliert wurden:

$$p = \underline{d} + (\underline{c} - \underline{d}) * (1 - \exp(-(\underline{t} - \underline{a}) / \underline{b})) \quad (1)$$

Der Parameter \underline{d} , der die Zufallsleistung repräsentiert, wurde gleich 0.5 gesetzt, da eine 2IFC Aufgabe Verwendung fand. Der Parameter \underline{c} repräsentiert die maximale Leistung und wurde daher gleich 1.0 gesetzt. Freie Parameter sind \underline{a} und \underline{b} . Parameter \underline{a} ist als "lift-off" - Parameter zu interpretieren und repräsentiert die minimale Darbietungszeit, die nötig ist, um aus dem Bereich der Zufallsleistung herauszukommen. Der Parameter \underline{b} bedeutet formal diejenige Präsentationszeit, die nötig ist, um die Leistung aus dem Zufallsbereich auf einen Wert von $1.0 - 1/e = 0.63$ zu heben. Dieses Zeitkonstantenmodell impliziert einen negativ beschleunigten Rückgang der Leistungsverbesserung mit zunehmender Präsentationszeit, wobei der Rückgang, den der Parameter \underline{b} kennzeichnet, konstant über die Zeit ist. Im Kontext der Lernmodelle wurde dieses Zeitkonstantenmodell "replacement model" (Restle & Greeno, 1970)² genannt. Der Parameter \underline{b} lenkt den Fokus auf die Verarbeitungszeit pro Einheit. Hier erlaubt der Parameter \underline{b} die Ableitung einer testbaren Hypothese im Rahmen der ZGF-Konzeption: Innerhalb des Subitizing-Bereiches ist die Verarbeitungszeit stochastisch gleich. Diese Hypothese basiert auf der Annahme, dass der Enumerationsprozess innerhalb des Subitizing-Bereiches die entsprechenden Numerositäten als informationell gleichartige Einheiten verarbeitet.

Methode

² Eine Annahme des replacement model ist, dass es richtige und falsche Antworttendenzen gibt und dass das Lernen im Ersetzen der falschen Antworttendenzen besteht, wobei dieses Ersetzen mit konstanter Rate erfolgt, welche proportional zum erreichten Genauigkeitsniveau ist, d.h. dem Niveau der schon ersetzten falschen Antworttendenzen. Dieses Modell der mittleren proportionalen Reduktion von Fehlerwahrscheinlichkeiten kann in dem selben informellen Sinne interpretiert werden, wie dies Loftus, Duncan und Gehrig (1992) vorschlugen. Sie sehen im Parameter \underline{b} die reziproke Rate der Informationsaquisition, derjenigen Information, die nötig ist, um falsche Antworttendenzen zu ersetzen. Je größer die Rate der Informationsaquisition, desto kleiner ist \underline{b} .

Beobachter

Zwei männliche Personen (TL, Alter: 29 Jahre, und WM, Alter: 34 Jahre) nahmen am Experiment teil. Beide Personen hatten korrigierte bzw. normale Sehfähigkeit.

Stimuli

Als Stimuli wurden 1 - 7 kleine Punkte (Durchmesser: 0.8mm) verwendet. Diese wurden zufällig in die Zellen einer virtuellen 8x8 Matrix platziert, die eine minimale Distanz von einem Punktdurchmesser zueinander hatten, um zu verhindern, dass sich die Punkte berühren. Jede Matrixzelle umfasste 4x4 Pixel auf einem 17" Monitor mit einer Auflösung von 832x624 und einer vertikalen Bildschirmwiederholfrequenz von 75 Hz, die von einem Macintosh Power PC 7100/66 gesteuert wurde. Die Matrix wurde in einen Rahmen platziert, der Abstand zwischen den Kanten des Rahmens und der Matrix betrug 4 Pixel. Der Rahmen wurde immer im Zentrum des Bildschirms präsentiert und nahm eine Fläche von 1.5 x 1.5 cm ein. Der ganze Rahmen wurde unter einem Sehwinkel von 1.0°, ein Punkt unter einem Sehwinkel von 0.054° gesehen. Der Kopf des Beobachters wurde durch eine Kinnstütze adjustiert, wobei der Abstand zwischen Augen und Rahmen 85 cm betrug. Die Maske bestand aus einem Zufallspunktemuster, sodass sie Eriksens (1980) minimale Bedingung für die Funktionsweise einer solchen erfüllte: Wenn die Maske auf den Stimulus projiziert wurde, konnte der Stimulus nicht mehr gesehen werden.

Grafikkarte und Bildschirm erlaubten die Darstellung von 256 Farben im RGB-Raum, wobei die Farbwerte von 0 (schwarz) bis 65535 (weiß) reichten. Die Hintergrundfarbe wurde auf 33% rot, grün und blau gesetzt, was in einem RGB Farbwert von 21845 resultierte. Der Kontrast zwischen den Punkten, dem Rahmen und dem Hintergrund wurde dadurch fixiert, dass der Farbwert der Punkte und des Rahmens auf 18 000 gesetzt wurden. Die Luminanz des Hintergrundes war 27.1 cd/m², die Luminanz der Maske 25 cd/m² (Kontrast: 0.04). Die Luminanz der Numerositäten 1, 2, 3 und 4 war 27.3 cd/m² (Kontrast: 0.004), die Luminanz der Numerositäten 5, 6 und 7 Punkte war 27.0 cd/m² (Kontrast: 0.002) und die Luminanz von Numerosität 8 war 28.8 cd/m² (Kontrast: 0.006).

Der Raum war abgedunkelt bis auf eine Lichtquelle, die sich hinter dem Bildschirm befand und Licht auf eine sich hinter dem Bildschirm befindliche, schwarze Fläche warf. Die Illuminanz jeweils 10 cm rechts und links von der Kante des Bildschirms betrug 11.3 lx und 11.0 lx. Auf der Höhe der Augen des Beobachters betrug die Illuminanz 9.08 lx.

Die 15 Präsentationszeiten (vgl. Tab. 3-1) wurden auf der Basis eines Bildschirmwiederholungszyklus (ca. 14 msec) realisiert, weswegen alle Darbietungszeiten Vielfache eines Bildschirmwiederholungszyklus waren. Die Präsentation eines neuen Stimulus wurde mit dem Kathodenstrahl so synchronisiert, dass der Kathodenstrahl auf den ersten Pixel in der linken oberen Ecke des Bildschirms platziert wurde, bevor der Stimulus auf den Bildschirm geschrieben wurde.

Tab. 3-1: Präsentationszeiten (msec)

1	27
2	40
3	54
4	68
5	82
6	95
7	109
8	123
9	137
10	151
11	179
12	207
13	249
14	305
15	412

Versuchsablauf

Das Experiment wurde als 2-Interval-Forced-Choice Aufgabe (2IFC) umgesetzt. Die Beobachter hatten zwei Numerositäten zu diskriminieren, n versus $n+1$ Punkte ($n = 0$ bis 6), die in zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Rahmen präsentiert wurden, wobei die Zuordnung der Zielnumerosität zu Rahmen 1 oder Rahmen 2 jeweils zufällig geschah. Der Methode der konstanten Stimuli gemäß fungierte jede Numerosität gleich häufig als Standard- und als Vergleichsreiz, um Fehler durch zeitliche oder räumliche Anordnungen zu verhindern.

Jede Diskrimination von n versus $n+1$ Punkten wurde in einer Sitzung durchgeführt, sodass das Experiment insgesamt 7 Versuchssitzungen umfasste. Die Abfolge der Sitzungen, auf- oder absteigend bezogen auf die Numerosität $n+1$, wurde zwischen den Beobachtern ausbalanciert. In jeder Sitzung waren die 15 Präsentationszeiten geblockt, die Abfolge der Blöcke, auf- oder absteigend, war zwischen den Beobachtern ausbalanciert. Jeder Block bestand aus 48 Durchgängen, demzufolge eine Sitzung, in der n versus $n+1$ Punkte diskriminiert wurden, aus 720 Durchgängen. Vor jeder Sitzung wurden 180 Übungsdurchgänge durchgeführt (12 Übungsdurchgänge pro Präsentationszeit). Nach jedem Block wurde programmgesteuert eine Pause von 2 Minuten eingelegt, nach jedem Übungsblock 1 Minute. Eine Sitzung dauerte ungefähr 2.5 Stunden.

Jeder Durchgang bestand aus der folgenden Sequenz: Fixationskreuz (Dauer: 500msec), Rahmen 1 mit Numerosität n oder $n+1$ (x msec), Zufallspunktemaske (Dauer: 1000msec), Fixationskreuz (Dauer: 500msec), Rahmen 2 mit Numerosität n oder $n+1$ (x msec; selbe Dauer wie Rahmen 1), Zufallspunktemaske (Dauer: 1000msec). Nach der zweiten Zufallspunktemaske wurden die Beobachter per Bildschirmanzeige gefragt, ob sie im Rahmen 1 oder im Rahmen 2 $n+1$ Punkte gesehen haben. Die Beobachter mussten die linke oder die rechte Cursortaste drücken, um Rahmen 1

oder Rahmen 2 anzuzeigen. Die Richtigkeit der Antwort (“richtig”, “falsch”) wurde per Bildschirmanzeige rückgemeldet.

Ergebnisse

Schätzung der Zeit-Genauigkeits-Funktionen

Die abhängige Variable war die Wahrscheinlichkeit richtiger Diskriminationen (p) pro Präsentationszeit (t) und Numerositätsvergleich. Die Datenstruktur, die jeder Funktion zugrunde liegt, besteht aus drei Datenvektoren: (1) 15 Darbietungszeiten, (2) 48 Elementen pro Präsentationszeit) und (3) die Wahrscheinlichkeit korrekter Antworten pro Präsentationszeit. In den Abbildungen 1a bis 1g und 2a bis 2g sind die empirischen Häufigkeitsfunktionen über den Darbietungszeiten jeweils für die beiden Beobachter dargestellt (vgl. Anhang).

Die Funktion der Gleichung (1) wurde an die sieben empirischen Häufigkeitsverteilungen der beiden Beobachter angepasst. Die Varianz der Exponentialfunktionen hängt von der prozentualen Häufigkeit richtiger Antworten ab (d.h. $n * p * (1-p)$). Daher wurde Neyman's χ^2 -Statistik als Schätzer verwendet (d.h., $(n_o - n_e)^2/n_o$, wobei n_o und n_e die beobachteten und die erwarteten Häufigkeiten sind). Die Berechnung der χ^2 -Werte hängt von der Struktur der Kontingenztafel ab, die aus der “Art der Antwort” (richtig, falsch) gekreuzt mit “Darbietungszeit” aufgebaut ist. Ein einzelner χ^2 -Wert basiert auf zwei Zellen pro Darbietungszeit, p (Anteil richtiger Antworten) und q ($q = 1-p$), die zusammen $\chi^2 = n (p_o * p_e)^2/p_o + n(q_o * q_e)^2/q_o$ ergeben, das sich zu $\chi^2 = N (p_o * p_e)^2/p_o$, mit $n =$ Anzahl der Präsentationen, vereinfachen lässt (Cramér, 1946; Lewis & Burke, 1949). Der χ^2 -Wert einer ganzen Kontingenztafel ergibt sich aus der Summation über die Darbietungszeitzellen. Da die sieben empirischen Verteilungsfunktionen pro Beobachter simultan angepasst wurden, wurden die χ^2 -Werte über die 7 Kontingenztafeln summiert. Die Parameter a und b der sieben Funktionen wurden über die Minimierung dieses χ^2 - Wertes bestimmt, wobei diese Minimierung mit dem CNLR-Modul aus SPSS ausgeführt wurde (SPSS for Macintosh, Release 6.1.1; SPSS Inc., 1995). Die Freiheitsgrade (df) wurden folgendermaßen berechnet: Jede Reihe der Kontingenztafel unterliegt der Restriktion, dass $p_o + p_e = 1$, weswegen jede Reihe ein $df = 1$ aufweist. Da sieben empirische Häufigkeitsverteilungen simultan mit jeweils zwei Parametern a und b angepasst wurden, wurden 14 df von den 7×15 Präsentationszeiten abgezogen, was in 91 df pro Datensatz eines Beobachters resultierte. Die Residuen der angepassten Exponentialfunktionen zeigten keine signifikante Abweichung von der Standardnormalverteilung, was über Kolmogoroff-Smirnov-Tests geprüft wurde.

Tab. 3-2: Beobachter WM - Angepasste Modelle

Modell	a - Parameter	b - Parameter
1	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, \dots, 7)$
2	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 3, \dots, 7) b_2=b_1$
3	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 4, \dots, 7) b_3=b_2=b_1$
4	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 5, \dots, 7) b_4=b_3=b_2=b_1$
5	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 6, 7) b_5=b_4=b_3=b_2=b_1$
6	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=7) b_6=b_5=b_4=b_3=b_2=b_1$

Tab. 3-3: Beobachter WM - a-Parameter

Modell	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
1	22.85	27.00	35.43	35.43	40.00	40.00	40.00
2	21.27	31.07	35.18	35.18	40.01	40.01	40.01
3	21.67	31.40	34.77	34.77	39.99	39.99	39.99
4	19.27	29.21	33.67	47.20	47.20	47.20	47.20
5	16.66	27.00	31.20	47.96	51.15	51.15	51.15
6	12.81	27.00	27.26	38.82	54.96	54.96	54.96

Tab. 3-4: Beobachter WM - b - Parameter

Modell	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
1	53.75	60.82	54.35	76.33	82.79	135.22	120.72
2	56.03	56.03	54.56	76.90	82.87	135.67	120.29
3	55.45	55.45	55.45	77.12	82.75	135.75	120.51
4	58.55	58.55	58.55	58.55	75.06	122.30	114.30
5	61.85	61.85	61.85	61.85	61.85	119.10	109.87
6	66.28	66.28	66.28	66.28	66.28	66.28	104.84

Tab. 3-5: Beobachter WM: Güte der Anpassung der Modelle

Modell	chi ²	p(chi ²)	N;df	d(chi ²) _{i-(i-1)} (i=2, ..., 5)	p(d(chi ²)) (df)	RMSE ³
1	86.95	.75	98;79	----	----	.05
2	87.20	.73	98;80	.25	.38	.05
3	87.23	.70	98;81	.04	.15	.05
4	90.80	.76	98;82	3.57	.94	.05
5	94.24	.81	98;83	3.44	.94	.05
6	110.4	.97	98;84	16.11	1.00	.06

³ Root Mean Squared Error

Tab. 3-6: Beobachter TL: Angepasste Modelle

Modell	a - Parameter	b - Parameter
1	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,\dots,7)$
2	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,2,5,\dots,7) b_4 = b_3 = b_1$
3	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=3,\dots,7) b_2 = b_1$

Tab. 3-7: Beobachter TL: a-Parameter

Modell	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
1	21.38	71.54	71.54	71.54	71.54	71.54	71.54
2	22.46	70.66	70.66	71.99	71.99	71.99	71.99
3	37.91	60.40	63.89	63.89	63.89	63.89	63.89

Tab. 3-8: Beobachter TL: b - Parameter

Modell	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
1	100.71	56.57	94.04	102.06	179.66	270.84	361.86
2	98.66	57.36	98.66	98.66	178.91	270.02	360.87
3	72.45	72.45	102.98	111.09	192.18	285.01	378.48

Tab.3-9: Beobachter TL: Güte der Anpassung der Modelle

Modell	χ^2	$p(\chi^2)$	N; df	$d(\chi^2)_{i-(i-1)}$ ($i=2,\dots,5$)	$p(d(\chi^2))$	$df(d(\chi^2))$	RMSE
1	95.11	.74	105;87	----	----	----	.06
2	95.35	.70	105;89	.24	.38	1	.06
3	100.29	.83	105;88	4.94	.97	1	.06

Parameterbeschränkungen und Güte der Anpassung

Für die Anpassung und Parameterbeschränkung wurde von folgender Hypothese ausgegangen: Wenn Subitizing als perzeptives Erfassen von Numerositäten ein qualitativ anderer Prozess als Zählen ist und der simultanen Instantiierung kleinerer Feature-Anzahlen dient, dann sollte innerhalb des Subitizing-Bereiches die Rate der Informationsextraktion stochastisch nicht monoton steigend sein. Die Implikationen für die ZGF-Parameter sind die folgenden: Die \underline{b} -Parameter innerhalb des Subitizing-range sollten stochastisch nicht monoton steigen ($b_{01} \quad b_{12} \quad b_{23} \quad b_{34} < b_{45} < b_{56} < b_{67}$). Der Beginn des Anstiegs markiert den Subitizingbereiches.

Die erste Anpassung aller Funktionen basierte stets auf einer freien Schätzung der Parameter. Die Parameter \underline{a} und \underline{b} wurden ≥ 1 gesetzt und die \underline{a} -Parameter sollten einer schwach monotonen Relation gehorchen (vgl. Tab. 3-2 und Tab. 3-6). Diese unbeschränkte Parameterschätzung konstituierte das Basismodell (Modell 1 in Tab. 3-2 und Tab.3-6) im aufsteigend paarweise gleich gesetzt wurden: (1) $b_{0vs1} = b_{1vs2}$; (2) $b_{1vs2} = b_{2vs3}$, (3) $b_{2vs3} = b_{3vs4}$, (4) $b_{3vs4} = b_{4vs5}$ usw. Die Beschränkungen, die den \underline{b} -Parametern aus Modell 1 auferlegt wurden, können ebenfalls Tabelle 3-2 und 3-6 entnommen werden. Wie aus den Tabellen 3-5 und 3-9 zu ersehen ist, ist die Güte der Anpassung für das Basismodell sehr gut. In den Abbildungen 1a bis 1g bzw. 2a bis 2g sind die Werte, die aus dem Basismodell vorhergesagt wurden, über den Darbietungszeiten abgetragen (vgl. Anhang).

Die empirischen ZGFs, die die Darbietungszeit und die Genauigkeit der Diskrimination von \underline{n} versus $\underline{n+1}$ Punkten zueinander in Beziehung setzen, wurden mittels der Exponentialfunktion (1)

modelliert. Innerhalb des Subitizing-Bereiches sollte die Rate der Informationsaquisition stochastisch nicht monoton steigend sein, außerhalb dieses Bereiches sollte diese Rate monoton abfallen, das heißt, dass der Parameter \underline{b} , die Inverse der Rate, monoton wachsen sollte. Um dieses Modell zu testen, wurden einige \underline{b} -Parameter des Basismodells dahingehend beschränkt, dass sie entsprechend Tabelle 3-2 und 3-6 gleichgesetzt wurden, um beispielsweise zu prüfen, ob die empirischen ZGFn von 1 vs 2 Punkten und von 2 vs 3 Punkten durch Exponentialfunktionen mit gleichen \underline{b} -Parametern beschrieben werden können. Das Gleichsetzen von n \underline{b} -Parametern führt dazu, dass $n-1$ df pro ZGF zu addieren sind. Die daraus resultierenden kumulierten Wahrscheinlichkeiten der entsprechenden χ^2 -Werte sind in der Spalte 3 der Tabellen 3-5 und 3-9 dargestellt. Um den Subitizing-Bereich über das Gleichsetzen der Informationsextraktionsraten identifizieren zu können, wurden die Differenzen der minimierten χ^2 -Werte gebildet, indem der i -te χ^2 -Wert vom $i-1$ ten χ^2 -Wert (mit $i \geq 2$) abgezogen wurde (vgl. Tabelle 3-5 und Tabelle 3-9, Spalte 5). Da Differenzen von χ^2 -Werten mit $df = 1$ ebenfalls χ^2 -verteilt sind, wurde die exakte kumulierte Wahrscheinlichkeit der jeweiligen χ^2 -Differenz-Werte ermittelt, die in Spalte 6 der Tabellen 3-5 und 3-9 zu finden sind. War diese Wahrscheinlichkeit kleiner als .95, wurde auf eine stochastische Äquivalenz der korrespondierenden \underline{b} -Parameter geschlossen.

Folgt man dieser Logik, dann können die Diskriminations-ZGFn von 0 vs 1 bis 4 vs 5 des Beobachters WM mit der gleichen Informationsverarbeitungsrate beschrieben werden (Modell 5 in Tabelle 3-2 und Tabelle 3-4). Statistische Äquivalenz trifft im Falle des Beobachters TL für die ZGF von 0 vs 1 bis 3 vs 4 zu (Modell 2 in Tabelle 3-6 und Tabelle 3-8), der allerdings eine Zunahme der Informationsaquisitionsrate innerhalb des Subitizing-Bereiches (ZGF von 1 vs 2) zeigt, was aber der Annahme einer nicht monotonen Steigung nicht widerspricht. Die entsprechenden Graphen des Modelles 5 (Beobachter WM) und des Modelles 2 (Beobachter TL) sind in den Abbildungen 3 und 4 im Anhang dargestellt.

Diskussion des Experimentes 1

Das Experiment zeigt, dass die Diskrimination von \underline{n} vs $\underline{n+1}$ Punkten in einer 2IFC-Aufgabe einen Subitizing-Bereich von 1 bis 4 bzw. 1 bis 3 nahelegt, was in guter Übereinstimmung mit anderen Befunden steht (vgl. die Übersicht bei Trick & Pylyshyn, 1994a). Die empirische Evidenz für diesen Subitizing-Bereich stammt größtenteils aus Studien, die Reaktionszeiten als abhängige Variable verwendeten. Die Steigungen der linearen Regressionsfunktionen mit der Numerosität als Prädiktor und der Reaktionszeit als Kriterium zeigten keinen oder einen nur minimalen Anstieg innerhalb des Subitizing-Bereiches, jedoch einen markanten Anstieg außerhalb dieses Bereiches. Die Evidenz für Subitizing wird meist als parallele Informationsverarbeitung interpretiert, eine signifikante Steigung hingegen als serielle.

In dieser Studie wurde ein deutlich größerer Bereich von Numerositäten untersucht und die gesamte psychometrische Zeitgenauigkeitsfunktion für jede Numerosität ausgemessen, was einen Subitizing-Bereich, der 1 bis 4 Elemente umfasst, belegt. Die statistische Äquivalenz der \underline{b} -Parameter der ZGF indiziert, dass gleiche Verarbeitungszeiten nötig sind, um innerhalb des Subitizing-Bereiches \underline{n} von $\underline{n+1}$ Punkten zu diskriminieren. Es gibt keine Steigung innerhalb des Subitizing-Bereiches, folglich keinen Anstieg der Verarbeitungsanforderungen mit ansteigender Numerosität, was mit einem parallel unbeschränkten Kapazitätsmodell vereinbar ist (Townsend & Ashby, 1983). Dieses Ergebnis ist konsistent mit Befunden von Sagi und Julesz (1985a), Lorinstein und Haber (1975) sowie Oyama,

Kikuchi und Ichihara (1981), welche sehr kleine Steigungen innerhalb eines SOA-Bereiches von 1.9msec bis 4msec fanden, der ausreichend war, um 95% korrekte Entscheidungen zu erzielen.

Das Vorgehen in der berichteten Studie zur Diskrimination von Numerositäten unterschied sich von denjenigen Verfahrensweisen, die Sagi und Julesz (1985a) sowie Folk, Egeth und Kwak (1988) anwandten. Beide bezeichneten den Vergleich von n mit $n+1$ Stimuli als Diskrimination. Ihre experimentelle Prozedur machte eine Diskrimination nicht erforderlich, sondern Enumeration im Sinne einer Identifikation. Es wurde nur ein Stimulus präsentiert und die Beobachter hatten eine der Numerosität entsprechende Antwort zu geben. Der einzige Aspekt, der an eine Diskriminationsaufgabe erinnert, bestand darin, dass die Beobachter die Wahl zwischen zwei Numerositätsbenennungen hatten. Im Gegensatz zu dieser "single frame condition" wurde in unserer Studie eine "serial double frame condition" realisiert.

Da der Subitizing-Bereich nicht von einer Numerosität, sondern von einer Diskrimination zweier Numerositäten begrenzt wird, stellte sich die Frage, welche der beiden kritischen Numerositäten der Diskriminationsfunktion die Grenze des Bereichs markiert. Die Entscheidung fiel für die kleinere Numerosität, denn die serielle Präsentation erlaubt ein Hypothesentesten der Art: Wenn die größere Numerosität nicht in der Weise des Subitizing erfasst werden kann, aber die kleinere, dann kann diese Information genutzt werden, um die Position der größeren zu erschließen ("Ich sah n zuerst, also muss in der zweiten Präsentation $n+1$ gezeigt worden sein").

3. 5. 2 Experiment 2

Ein größeres Problem mit Anzahldiskriminationstudien liegt in der Möglichkeit, dass partielle Information genutzt wird, um die größere Numerosität als "zuerst" oder "an zweiter Stelle" zu erschließen. Es wäre möglich, die Numerositäten n oder $n+1$ nur als Anzeichen für "mehr" oder "weniger" zu nutzen, um somit die zeitliche Position von $n+1$ nur durch die "mehr"-Information zu identifizieren. Um diesem Problem zu begegnen, wurde ein Verfahren realisiert, das mit demjenigen von Sagi und Julesz (1985a) sowie Folk, Egeth und Kwak (1988) vergleichbar war.

Method

Beobachter

Es nahmen die selben Beobachter wie in Experiment 1 teil.

Stimuli

Vgl. Experiment 1.

Prozedur

Die Prozedur war identisch mit derjenigen von Experiment 1, mit der Ausnahme von zwei Variationen:

- (1) Das Experiment wurde als eine 1-Interval-Forced-Choice Aufgabe (1IFC) realisiert. Die Beobachter hatten eine von zwei möglichen Numerositäten zu identifizieren, n oder $n+1$ Punkte ($n = 0 - 6$) pro Sitzung. In jedem Durchgang wurde nur eine Numerosität präsentiert.
- (2) Jede Numerosität wurde 24mal pro Präsentationszeit dargeboten. Mit der Ausnahme von $n = 0$ und $n+1 = 7$ diente jede Numerosität 24mal pro Präsentationszeit als größere oder kleinere Numerosität. Entsprechend sah die Sequenz eines Durchgangs folgendermaßen aus: Fixationskreuz (500 msec), Rahmen mit n oder $n+1$ Punkten (x msec), Zufallspunktemaske (1000 msec), Frage: "Haben Sie n

oder $n+1$ Punkte gesehen?“ Geantwortet werden konnte durch Drücken der linken oder rechten Cursortaste, die n oder $n+1$ Punkte indizierten. Auf dem Bildschirm wurde die Richtigkeit der Antwort rückgemeldet (“richtig” oder “falsch”).

Es gab sieben Sitzungen, von denen jede der 15 Präsentationszeiten (vgl. Tab. 3-1) 48 Durchgänge umfasste und zu Beginn wurden 15 Übungsblöcke à 12 Durchgänge realisiert. Die Abfolge der Sitzungen bzw. Blöcke entsprach derjenigen aus Experiment 1. Jede Sitzung dauerte ungefähr 2.5 Stunden mit dem gleichen Pausenplan wie Experiment 1.

Schätzung der ZGF

Die Funktion der Gleichung (1) wurde an die Daten angepasst wie dies für Experiment 1 beschrieben wurde. Jeder Datensatz bestand wiederum aus (a) 15 Darbietungszeiten, (b) der Anzahl der Elemente pro Darbietungszeit und (c) der relativen Häufigkeit richtiger Antworten pro Darbietungszeit. Aufgrund der gleichen a priori Wahrscheinlichkeiten der Präsentation von n oder $n+1$ Punkten wurden die Antworten aggregiert und das arithmetische Mittel der Prozentwerte der Treffer pro Darbietungszeit und Sitzung berechnet. Der resultierende Trefferprozentwert weist ein Maximum am Schnittpunkt der sich überlappenden Verteilungen über die Treffer bei n bzw. $n+1$ Punkten auf; dieser Punkt entspricht dem Entscheidungskriterium des Beobachters (Green & Swets, 1966; McFadden, 1970). Da die b -Parameter die mittlere Rate der Informationsgewinnung beider Numerositäten schätzen, wird die Subitizing-Grenze durch den $n+1$ -Wert der entsprechenden Diskriminanda markiert.

Parameterbeschränkungen und Güte der Anpassung

Die Basismodelle und die abgeleiteten Modelle wurden analog zu Experiment 1 konstruiert; die entsprechenden Parameter und Werte der Güte der Anpassung können aus den Tabellen 3-10 bis 3-17 ersehen werden. Bei beiden Beobachtern lässt sich das Basismodell sehr gut anpassen. Die aus dem Basismodell vorhergesagten Werte und die entsprechenden empirischen Werte sind in den Abbildungen 5a-5g und 6a-6g im Anhang dargestellt. Bis zur Numerosität 3 sind die Informationsaquisitionsraten, die b -Parameter, bei beiden Beobachtern statistisch äquivalent (Modell 3, Tab. 3-13 und Modell 4, Tab.3-16). Die vorhergesagten Werte dieser Modelle sind in den Abbildungen 7 und 8 im Anhang dargestellt.

Tab. 3-10: Beobachter WM: Angepasste Modelle

Modell	a - Parameter	b - Parameter
1	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, \dots, 7)$
2	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 3, \dots, 7) b_2=b_1$
3	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 4, \dots, 7) b_3=b_2=b_1$
4	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2, \dots, 6)$	$b_i \geq 1 (i=1, 5, \dots, 7) b_4=b_3=b_2=b_1$

Tab. 3-11: Beobachter WM: a-Parameter

Modell	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
1	46.72	46.72	46.72	46.72	53.52	53.52	54.00
2	46.54	46.54	46.54	47.45	54.00	54.00	54.00
3	37.29	37.29	54.00	54.00	54.00	54.00	54.00
4	32.40	32.40	52.69	52.69	52.69	52.69	52.69

Tab. 3-12: Beobachter WM: b - Parameter

Modell	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
1	44.94	35.38	68.50	95.31	129.63	165.94	244.31
2	40.41	40.41	68.70	93.23	127.88	163.93	246.96
3	51.18	51.18	51.18	84.34	127.33	164.46	246.74
4	57.49	57.49	57.49	57.49	120.22	156.28	236.07

Tab. 3-13: Beobachter WM: Güte der Anpassung der Modelle

Modell	chi ²	p(chi ²)	N;df	d(chi ²) _{i:(i+1)} (i=2, ..., 5)	p(d(chi ²)) (df)	RMSE
1	68.26	.04	105;90	----	----	.06
2	69.36	.04	105;91	1.11	.71	.06
3	72.38	.07	105;92	3.02	.92	.07
4	77.19	.12	105;93	4.81	.97	.07

Tab. 3-14: Beobachter TL: Angepasste Modelle

Modell	a - Parameter	b - Parameter
1	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,\dots,7)$
2	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,3,\dots,7) b_2=b_1$
3	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,4,\dots,7) b_3=b_2=b_1$
4	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,5,\dots,7) b_4=b_3=b_2=b_1$
5	$a_1 \geq 1; a_i a_{i+1} (i=2,\dots,6)$	$b_i \geq 1 (i=1,6,7) b_5=b_4=b_3=b_2=b_1$

Tab. 3-15: Beobachter TL: a-Parameter

Modell	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
1	58.37	58.37	58.37	58.37	58.37	58.37	58.37
2	54.00	61.54	61.54	61.54	61.54	61.54	61.54
3	52.61	63.08	63.08	63.08	63.08	63.08	63.08
4	52.71	63.28	63.28	63.28	63.28	63.28	63.28
5	44.86	58.88	63.31	66.17	66.17	66.17	66.17

Tab. 3-16: Beobachter TL: b - Parameter

Modell	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
1	64.37	87.73	92.56	145.38	175.34	173.70	216.51
2	74.37	74.37	89.03	141.52	171.88	170.37	212.23
3	77.67	77.67	77.67	139.70	168.25	167.13	210.91
4	77.50	77.50	77.50	152.61	152.61	166.88	210.61
5	88.40	88.40	88.40	88.40	163.67	162.77	207.54

Tab.3-17: Beobachter TL: Güte der Anpassung der Modelle

Modell	χ^2	$p(\chi^2)$	N; df	$d(\chi^2)_{r(i-1)}$ ($i=2,\dots,5$)	$p(d(\chi^2))$	$df(d(\chi^2))$	RMSE
1	61.07	.01	105;90	----	----	----	.07
2	62.66	.01	105;91	1.60	.79	1	.07
3	63.52	.01	105;92	.85	.64	1	.07
4	64.11	.01	105;94	.59	.56	1	.07
5	71.58	.05	105;93	7.47	.99	1	.07

Diskussion des Experimentes 2

Diese Resultate sind denjenigen aus Experiment 1 vergleichbar und entsprechen den berichteten Subitizing-Bereichen. Die Diskontinuität der \underline{b} -Parameter ist sehr ausgeprägt, insbesondere TL zeigt eine Verdopplung der Rate an der Grenze des Subitizing-Bereiches in Experiment 1 genauso wie in Experiment 2. Die gleichen Verarbeitungszeiten für kleine Numerositäten bis 3 oder 4 entsprechen der Aussage, dass in diesem Bereich die Informationsaquisitionsrate gleich bleibt, womit das Subitizing gekennzeichnet wird.

Der "lift-off"-Parameter (\underline{a} -Parameter der ZGFs) der Diskriminationsfunktion 0 vs 1 ist deutlich kleiner als diejenigen der anderen Diskriminationsfunktionen. In der sequentiellen Bedingung (Experiment 1, Tabellen 3-2 bis 3-9, Modell 5 (WM) und Modell 2 (TL)) war beim Beobachter WM innerhalb des Subitizing-Bereiches eine signifikante lineare Steigung des \underline{a} -Parameters von 8.99msec ($F(1,3) = 69.7, p < .001$) festzustellen im Gegensatz zum Beobachter TL, dessen \underline{a} -Parameter mit 14.8msec nicht signifikant anstieg ($F(1,2) = 3.3, p > .20$). Im Gegensatz zu diesem Befund war in der nicht-sequentiellen Bedingung des Experimentes 2 keine signifikante lineare Steigung der \underline{a} -Parameter festzustellen (Modell 3 Beobachter WM, Steigung der \underline{a} -Parameter 8.35ms, $F(1,1) = 3.0, p = .33$ und Modell 4 Beobachter TL, Steigung der \underline{a} -Parameter 5.29ms, $F(1,1) = 3.0, p = .33$). Da die Parameter \underline{a} und \underline{b} gemeinsam zur Gesamtverarbeitungszeit beitragen, kann aus dem Vorliegen gleicher Informationsaquisitionsraten nicht auf gleiche Verarbeitungszeiten geschlossen werden.

Der Beitrag der beiden Parameter zur Gesamtinformationsverarbeitungszeit kann aus dem Zeitbedarf \underline{t} berechnet werden, d.h. aus der Zeit, die nötig ist, um ein bestimmtes Genauigkeitsniveau p beim Antworten zu erreichen:

$$t = a - b * (\ln 2 + \ln(1-p)) \quad (2)$$

Die Relation zwischen den \underline{a} - und \underline{b} -Parametern sowie dem Zeitbedarf \underline{t} ist für den Fall einer Genauigkeit von $p = .63$ graphisch in den Abbildungen 9 bis 12 dargestellt. Für beide Experimentalbedingungen wurde $p = .63$ gewählt, weil es diejenige Genauigkeit ist, die nach \underline{b} ms erzielt werden kann (vgl. Abb. 9 bis 12 im Anhang).

Aus Gleichung 2 folgt, dass gleiche \underline{b} -Parameter als Konstante in die Bestimmung des \underline{a} -Parameters eingehen. Daher kann trotz gleicher \underline{b} -Parameter eine signifikante Zunahme der \underline{a} -Parameter auch im Subitizing-Bereich möglich sein, was einen bedeutsamen Anstieg der Gesamtverarbeitungszeit mit zunehmender Numerosität möglich macht. Dieser Sachverhalt war allerdings nur bei Beobachter WM in der sequentiellen Bedingung festzustellen. Daher ist die Annahme, dass Subitizing durch gleiche Verarbeitungszeiten charakterisiert werden kann, zu differenzieren: Die durch Subitizing beschriebene Weise des Verarbeitens kleiner Numerositäten impliziert zwar gleiche Informationsaquisitionsraten, aber keineswegs gleiche Initialisierungszeiten, in denen eine gewisse sensorische Verarbeitungsträgheit zu überwinden ist. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die lift-off-Zeit des Beobachters TL schon bei der einfachsten Diskrimination auf einem Niveau ist, das der Beobachter WM erst außerhalb des Subitizing-Bereiches erreicht.

3. 5. 3 Experiment 3

Subitizing kann also durch gleiche Informationsaquisitionsraten charakterisiert werden, aber nicht durch gleiche Initialisierungszeiten. Es stellt sich die Frage, ob sich dieser Befund mit dem Alter verändert. Um zu beantworten, wie Informationsaquisitionsrate und Initialisierungszeit in unterschiedlichen Altersgruppen variieren, wurde ein Experiment mit jüngeren und älteren Personen durchgeführt.

Beobachter

In diesem Experiment nahmen sieben jüngere Beobachter (mittleres Alter: 21.4 Jahre, SD: 4.98 Jahre, Streubreite: 18 bis 33 Jahre, zwei Männer und fünf Frauen) und sechs ältere Beobachter (mittleres Alter: 67.5 Jahre, SD: 2.6 Jahre, Streubreite: 66 bis 73 Jahre, drei Männer und zwei Frauen) teil. Die Teilnehmer erhielten für ihre Teilnahme je DM 200.

Stimuli

Cf. Experiment 1.

Versuchsablauf

Der Ablauf war identisch mit demjenigen aus Experiment 1 bis auf folgende Ausnahmen: Es gab acht Numerositätspaare, \underline{n} vs $\underline{n+1}$ Punkte mit $\underline{n} = 0$ bis 8. Jedes Paar wurde 24mal pro Präsentationszeit dargeboten. Jede Diskrimination eines Numerositätspaares wurde auf zwei getrennte Sitzungen verteilt, da es 40 Präsentationszeiten gab, womit das gesamte Experiment 16 Sitzungen umfasste. Jede Sitzung begann mit 80 Übungsdurchgängen. Die Präsentationszeiten waren in vier Blöcke in aufsteigender Reihenfolge unterteilt. Zwischen je zwei Blöcken wurde eine Pause von 5 Minuten eingelegt, jede Sitzung dauerte ca. 1 Stunde 40 Minuten. Aufgrund technischer Probleme waren die 40 Darbietungszeiten nicht mit den Bildschirmwiederholfrequenzen synchronisiert. Dies hatte zur Folge, dass sich ca. die Hälfte der Darbietungszeiten überlappten. Deswegen wurden die Darbietungszeiten so aggregiert, dass 16, sich nicht überlappende Zeitintervalle entstanden, die durch das Intervall der Zeitdauer des minimalen und maximalen Bildschirmwiederholzyklus repräsentiert werden (vgl. Tab. 3-18). Dies führte neben der höheren Reliabilität der Daten dazu, dass diese Präsentationszeiten besser mit Experiment 1 vergleichbar sind.

Ergebnisse

Schätzung der ZGF

Die Funktion der Gleichung (1) wurde wie in Experiment 1 beschrieben an die Daten angepasst. Jeder Datensatz bestand aus (a) 16 Darbietungszeiten, (b) den jeweiligen Numerositäten pro Präsentationszeit und (c) den relativen Häufigkeiten richtiger Antworten pro Darbietungszeit. Eine jüngere Person wurde von der Analyse ausgeschlossen, da deren Daten eine sehr hohe Varianz aufwiesen.

Beschränkung der Parameter und Güte der Anpassung

Bei 8 von 12 analysierten Beobachtern (3 jüngere, 4 ältere Personen) konnte eine ausgezeichnete Anpassung erzielt werden, indem die b -Parameter "0 vs 1", "1 vs 2", "2 vs 3" und "3 vs 4" gleichgesetzt wurden. Bei vieren der analysierten Beobachter (2 jüngere, 2 ältere Personen) wurde eine gute Anpassung dadurch erzielt, dass die b -Parameter "1 vs 2", "2 vs 3" und "3 vs 4" gleichgesetzt wurden und "0 vs 1" unbeschränkt blieb. Die Parameter "0 vs 1" spiegeln die Informationsaquisition für das Entdecken eines Inkrementes vor einem Hintergrundrauschen

Tab.3-18: Darbietungszeiten (msec)

1	28.6 - 42.9
2	57.2-71.5
3	85.8-100.1
4	100.1-114.4
5	114.4-128.7
6	128.7-143
7	143-157.3
8	171.6-185.9
9	200.2-214.5
10	257.4-271.7
11	328.9-343.2
12	443.3-457.6
13	772.2-786.5
14	1287-1301.3
15	1487.2-1501.5
16	1687.4-1701.7

wider und sind daher mit dem Informationsgewinn beim Entdecken einer Differenz nicht völlig vergleichbar (Laming, 1986). Die 6 Parametersätze der beiden Altersgruppen wurden gemittelt (vgl. Tabelle 3-19 und 3-20), da die individuellen Muster der beschränkten b -Parameter sehr ähnlich und die Modelle ausgezeichnet oder akzeptabel anzupassen waren. Die Graphen der Funktionen, die auf den gemittelten beschränkten b -Parametern beruhen, sind für jede Altersgruppe separat in den Abbildungen 13 und 14 im Anhang dargestellt. (Die folgenden Analysen basieren alle auf den parameterrestringierten Modellen).

Tab. 3-19: Gemittelte a-Parameter der beiden Altersgruppen

Gruppe der Jüngeren				Gruppe der Älteren			
Param.	AM	SD	N	Param.	AM	SD	N
a1	37.18	11.67	6	a1	58.46	27.69	6
a2	31.48	14.47	6	a2	69.45	27.00	6
a3	27.23	12.03	6	a3	81.50	23.21	6
a4	36.07	12.09	6	a4	81.05	17.17	6
a5	34.13	8.18	6	a5	86.07	16.15	6
a5	31.29	19.63	6	a6	74.98	27.43	6
a7	35.52	27.78	6	a7	71.13	30.73	6
a8	19.91	18.03	6	a8	41.89	40.44	6

Tab. 3-20: Gemittelte b-Parameter der beiden Altersgruppen

Gruppe der Jüngeren				Gruppe der Älteren			
Param.	AM	SD	N	Param.	AM	SD	N
b1	28.68	10.56	6	b1	111.49	79.99	6
b2	41.02	8.93	6	b2	106.39	64.55	6
b3	45.21	13.59	6	b3	90.73	51.24	6
b4	49.94	19.77	6	b4	103.66	57.68	6
b5	77.23	36.31	6	b5	126.72	66.92	6
b5	110.66	64.89	6	b6	181.30	101.75	6
b7	169.36	138.95	6	b7	271.89	173.16	6
b8	226.87	124.54	6	b8	538.46	485.30	6

Um den Subitizing-Bereich zu ermitteln und simultan Interaktionen mit dem Alter zu bestimmen, wurde eine 2 x 8-MANOVA gerechnet, mit Alter als Zwischensubjektfaktor und den \underline{b} -Parametern als Innersubjektfaktoren, was einer Profilanalyse über die \underline{b} -Parameter entspricht. (Hinweis: Die \underline{b} - und die \underline{a} -Parameter wurden in natürliche Logarithmen transformiert).

Wenn sich die interindividuellen Differenzen primär in der Initialisierungszeit abbilden sollten, dann sollten die Unterschiede in den \underline{a} -Parametern der Diskriminations-ZGFs vom Alter abhängig sein, also eine Wechselwirkung zwischen Alter und \underline{a} -Parameter auftreten. Innerhalb des Subitizing-Bereiches sollten über die Diskriminations-ZGFs keine signifikanten \underline{b} -Parameterdifferenzen auftreten; Subitizing sollte also auch im Alter nachweisbar sein, obgleich die Rate des Informationsgewinns im Alter durchaus kleiner ausfallen kann.

Das mittlere Niveau der \underline{b} -Parameter ist signifikant positiv von Null verschieden ($t = 33.9$, $df = 1$, $p = .000$). Die \underline{b} -Parameter der älteren Beobachter sind bedeutsam größer als diejenigen der jüngeren Beobachter ($t = -2.5$, $df = 1$, $p = .03$), was einem Haupteffekt des Alters entspricht. Obgleich beide Altersprofile der \underline{b} -Parameter also bedeutsam niveaueverschieden sind, sind sie parallel, was bedeutet, dass sich die \underline{b} -Parameterdifferenzen nicht altersbedingt unterscheiden (Hotellings $T = 1.77$, $F(7;4 \text{ df}) = 1.00$, $p = .53$). Es existiert also keine Interaktion zwischen Alter und Informationsaquisitionsrate. Der multivariate Test der aggregierten Altersprofile der \underline{b} -Parameter belegte die signifikante Steigung des mittleren Profils (Hotellings $T^2 = 44.9$, $F(7;4 \text{ df}) = 25.7$, $p = .004$). Univariate F-Tests der \underline{b} -Parameterdifferenzen der sukzessiven Diskriminations-ZGFs ergaben keine signifikanten Unterschiede

zwischen "0 vs 1" und "1 vs 2" ($F(1;10\text{ df})=3.21, p=.10$), "1 vs 2" und "2 vs 3" ($F(1;10\text{ df}) = 0.13, p=.73$) sowie "2 vs 3" und "3 vs 4" ($F(1;10\text{ df})=2.16\text{ }p=.17$). Signifikant waren die Unterschiede zwischen "3 vs 4" und "4 vs 5" ($F(1;10\text{ df})=6.17, p=.032$), "4 vs 5" und "5 vs 6" ($F(1;10\text{ df})= 24.04, p=.001$), "5 vs 6" und "6 vs 7" ($F(1;10\text{ df})= 14.33, p=.004$) sowie "6 vs 7" und "7 vs 8" ($F(1;10\text{ df})= 24.27, p=.001$). Die entsprechenden Parameterwerte zeigen, dass die \underline{b} -Parameter signifikant mit der Numerosität ansteigen, und zwar ab der ZGF von "4 vs 5" Punkten. Die mittlere Obergrenze des Subitizing-Bereiches ist daher 3.

Das mittlere Niveau der \underline{a} -Parameterdifferenzen ist signifikant positiv von Null verschieden ($t= 26.33, df=1, p=.000$). Die \underline{a} -Parameter der älteren Beobachter sind bedeutsam größer als diejenigen der jüngeren Beobachter ($t= -3.41, df=1, p=.007$), was einem Haupteffekt des Alters entspricht. Die Profile der \underline{a} -Parameterdifferenzen beider Altersgruppen sind parallel, es gibt also keine Interaktion von Alter und \underline{a} -Parameterdifferenzen zwischen den Diskriminations-ZGF ($\text{Hotellings } T^2 = 1.33; F(7;4\text{ df}) = 0.76, p=.65$). Das Profil der über das Alter aggregierten \underline{a} -Parameterdifferenzen ist flach, es zeigt sich kein signifikanter Anstieg der \underline{a} -Parameterdifferenzen ($\text{Hotellings } T^2 = 2.15; F(7;4\text{ df}) = 1.23, p= .44$). Die logarithmierten \underline{a} -Parameter kovariieren also nicht mit der Numerosität.

Die Profilanalyse der Initialisierungszeiten ergibt also einen Haupteffekt des Alters, keinen Effekt der Numerosität und keine Wechselwirkung zwischen Alter und Initialisierungszeit. Die Profilanalyse der Informationsaquisitionsraten hingegen zeigte neben dem Haupteffekt des Alters auch einen Haupteffekt der Numerosität, allerdings nur außerhalb des Subitizingbereiches, aber ebenfalls keine Wechselwirkung zwischen der Rate der Informationsaquisition und dem Alter.

Diskussion des Experiments 3

Die Hypothese, dass das Erfassen von bestimmten Numerositäten in der Art des Subitizing gleiche Informationsaquisitionsraten impliziert, konnte auch mit unterschiedlichen Altersgruppen bestätigt werden. Innerhalb des Subitizing-Bereiches sind die Informationsaquisitionsraten nicht durch das Alter moderiert und kovariieren nicht mit der Numerosität. Die älteren Beobachter brauchen mehr Zeit, um die Informationsaufnahme zu initialisieren, was aber genauso wie bei den jüngeren Beobachtern unabhängig von der Numerosität ist. Die älteren Beobachter sind also nicht in unproportionaler Weise betroffen. Obwohl die älteren Personen mehr Zeit brauchen, um die Informationsaufnahme zu starten und die Information aufzunehmen, sind sie im gleichen Ausmaß von der zunehmenden Numerosität beeinflusst wie die jüngeren Personen. Dies belegt gut die Zwei-Prozess-Theorie der Enumeration.

3. 5. 4 Diskussion der Experimente zum Subitizing

In den berichteten Studien ließ sich der Subitizing-Bereich mit der Obergrenze 3 oder 4 mit Hilfe der Zeit-Genauigkeits-Funktionen (ZGF) bestätigen. Die verwendete Methode unterscheidet sich von Reaktionszeitstudien dahingehend, dass Probleme der Reaktions-ausführung und des Zeit-Genauigkeits-Abgleiches umgangen werden können. Die Variation der Präsentationszeiten, kombiniert mit dem niedrigen Kontrast der Stimuli und der Verwendung einer Maske, beschränkten in abgestufter Weise die Informationen des perzeptuellen Korrelates des Stimulus. Die Genauigkeit wurde mit einer Exponentialfunktion vorhergesagt. Auf diese Weise wurde es ermöglicht, den Bereich des Subitizing

durch das Testen der stochastischen Dominanzrelation der Informationsextraktionsraten, die Inversen der kumulierten Exponentialverteilungen, und die b-Parameter der exponentiellen ZGF zu prüfen. Somit ist Subitizing durch einen Prozess charakterisiert, dessen Informationsextraktionsraten stochastisch nicht monoton in Abhängigkeit von der Numerosität steigen, also äquivalent sind. Außerhalb dieses Bereiches nehmen die Informationsextraktionsraten ab und es wird mehr Zeit benötigt, um eine vergleichbare Genauigkeit bei der Unterscheidung von Numerositäten zu erzielen.

Diese Ergebnismuster wurden mit zwei verschiedenen Anzahl-Diskriminationsaufgaben gefunden: In der sequentiellen Doppeldisplay-Bedingung (Experiment 1, Modell 5 bzw. 2) betrug die mittlere Verarbeitungszeit innerhalb des Subitizing-Bereiches 62msec (WM) und 88msec (TL), in der Einzeldisplay-Bedingung (Experiment 2, Modell 3 bzw. Modell 4) betrug die mittlere Verarbeitungszeit in diesem Bereich 73msec (WM) und 77msec (TL). Diese Werte stimmen bei beiden Experimenten recht gut überein, aber sie passen auch gut zu denjenigen aus Experiment 3: Die Verarbeitungszeit, gemittelt über die gesamte Stichprobe, beträgt innerhalb des Subitizing-Bereiches 71.25 msec (SD: 2.12msec), wobei die der älteren Personen 102.86msec (SD: 10.81msec), die der jüngeren Personen 38.30msec (SD: 8.59msec) beträgt. Diese Ergebnisse stimmen mit den Befunden von Sagi und Julesz (1985a), Lorinstein und Haber (1975) und Oyama et al. (1981) überein und erweitern sie mit einer verbesserten Methode.

Es stellt sich allerdings die Frage, ob Anzahl-Diskriminationsstudien eine eindeutige Identifikation des Subitizing-Bereiches erlauben. Die Diskrimination einer Numerosität n von einer Numerosität $n+1$ ist eine Differenzdetektion. Da der Beobachter die Größe beider Numerositäten kennt, ist es ausreichend, sich auf die Unterschiede zwischen beiden zu konzentrieren, ohne die Numerosität tatsächlich erfassen zu müssen. Die Numerosität, die den Eindruck "mehr" generierte könnte " $n+1$ ", die andere, die den Eindruck "weniger" generierte, könnte " n " genannt werden, wobei ein sicher gewonnener Eindruck ausreicht, um auch die andere Numerosität zu erschließen. Der Enumerationsprozess, der dem Subitizing zugrunde liegen soll, ist daher nur eine hinreichende, aber keine notwendige Bedingung, um die Anzahldiskrimination zu bewerkstelligen. Es ist plausibel, dass innerhalb eines bestimmten Bereiches beide Strategien, Subitizing und Differenzdetektion, angewandt werden können. Diejenigen Bereiche, in welchen nur Subitizing oder nur Differenzdetektion möglich sind, scheinen jedoch sehr klein zu sein. Anzahldiskriminationsstudien erlauben es demzufolge zwar, den Bereich des Subitizing zu identifizieren, ermöglichen aber keinen eindeutigen Schluss auf die Art des zugrundeliegenden Enumerationsprozesses.

Weitere Hinweise auf die gute Validität der Befunde ergeben sich aus dem Vergleich mit anderen Enumerationsstudien. Wynn (1992a, 1995) berichtet, dass 5 Monate alte Babys Numerositäten von 2 versus 3 sicher unterscheiden, unter bestimmten Bedingungen sogar 3 von 4, wobei die Blickdauer als abhängige Variable erhoben wurde. Trick, Enns und Brodeur (1996) verwendeten eine Anzahldiskriminationsaufgabe, die derjenigen aus Experiment 2 vergleichbar war. Das Alter der Versuchsteilnehmer reichte von 6 bis 72 Jahre. Sie benutzten die Reaktionszeit als abhängige Variable und verglichen den Numerositätsbereich von 1 bis 4 mit demjenigen von 6 bis 9 sowie zwei Altersgruppen, die jüngere mit einem mittleren Alter von 22 Jahren, die ältere mit einem mittleren Alter von 72 Jahren. Die Steigungen der mittleren genauigkeitskorrigierten

Reaktionszeitkurven unterschieden sich innerhalb des Subitizing-Bereiches nicht zwischen den beiden Altersgruppen, im Gegensatz dazu stand ein Alterseffekt beim Zählen.

Zusammengefasst legen diese Studien nahe, die von Balakrishnan und Ashby (1992) oder Gallistel und Gelman (1991) vorgeschlagene Ein-Prozess-Theorie der Enumeration zu verwerfen, da ein deutlicher Unterschied im Erfassen von kleineren und größeren Anzahlen in einer reliablen Weise identifizierbar ist. Im Gegensatz zu Anzahldiskriminationsstudien, die Reaktionslatenzen als abhängige Variablen verwendeten, besteht bei der Methode der Zeit-Genauigkeits-Funktionen nicht das Problem des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Abgleiches. Sie erlaubt das Messen und Testen der Informationsaquisitionsraten durch das Variieren der physikalischen Dimensionen des Stimulus. Operationalisiert man die Zwei-Prozess-Theorie der Anzahldiskrimination durch die Informationsaquisitionsrate, so können zunehmende Numerositäten im Subitizing-Bereich durch gleiche, zunehmende Numerositäten außerhalb des Subitizing-Bereiches, also Zählen, durch steigende Informationsextraktionsraten gekennzeichnet werden. Sie erlaubt eine Präzisierung dahin gehend, im Subitizing einen perceptiven Numerositätenerfassungsprozess zu sehen, dem statistisch äquivalente Informationsextraktionsraten entsprechen. Zusätzlich erlaubt das Ausmessen eines größeren Bereiches von Numerositäten mit der ZGF-Methode die Zerlegung der Verarbeitungszeit in mindestens zwei Komponenten, die Informationsaquisitionsrate (Inverse der b -Parameter) und die Initialisierungszeit (a -Parameter). Ein zunehmender Bedarf an Verarbeitungszeit mit zunehmender Numerosität schließt die Zwei-Prozess-Theorie der Enumeration nicht grundsätzlich aus, wenn diese Zunahme von der Initialisierungszeit und nicht von der Informationsaquisitionsrate verursacht wird. Es erscheint nicht unplausibel, dass die Initialisierungszeit im wesentlichen die interindividuellen Differenzen innerhalb des Subitizing-Bereiches verursacht. Der a -Parameter könnte sensitiver für Altersdifferenzen sein als der b -Parameter und legt eine Deutung als Initialisierungszeit nahe.

So erhöht sich zwar die Informationsextraktionsrate innerhalb des Subitizing-Bereiches mit dem Alter, aber nicht der Zeitbedarf für die Erfassung kleiner Mengen. Dieser scheint unabhängig von der Numerosität konstant über das Alter hinweg zu sein. Damit kann Subitizing als basale Konstante der menschlichen Informationsverarbeitung aufgefasst werden.

Ob es sich bei der Merkmal-Lokalisierung um einen Enumerationsprozess oder einen Unterschiedsentdeckungsprozess handelt, lässt sich nicht eindeutig feststellen. Die Perzeption kleiner Mengen ist im visuellen Bereich am ehesten mit dem FINST-Modell vereinbar, da es die detailliertesten Annahmen über die Individuation von Objektmerkmalen oder Objektmorphemen macht. Da das FINST-Modell als Basismodell des Object-file Modells interpretiert werden kann, ist die Beschränkung der Erklärungsmöglichkeit des visuellen Subitizing auf das FINST-Modell am sparsamsten. Dem FINST-Modell zufolge wäre das Phänomen des Subitizing eine non-numerische Kompetenz, eine Resultante der frühen Merkmalsindividuierung im Rahmen von Segmentations- und Bindungsprozessen bei der visuellen Objektgenese. Eine "numerischere" Interpretation erlaubte das Uhren-Zähler-Akkumulator-Modell von Meck & Church (1983), das Gallistel & Gelman (1991, 1992) als präverbales Zählmodell vorschlugen. Die Numerons als Repräsentate einer Numerosität sind analog durch den "Füllungszustand" eines Akkumulators realisiert, der im Arbeitsgedächtnis mit einer Referenzfüllung verglichen werden kann. Der Vorzug des Modells besteht darin, dass es direkt einen physiologisch realisierbaren Zähler annimmt, der den Zählprinzipien von Gelman & Gallistel (1978) konform arbeitet. Es lässt sich gut mit dem Konzept der neuronal realisierten Impulssequenzkodierung in

Einklang bringen. Das Phänomen des Subitizing wird diesem Modell zufolge von der intrinsischen Varianz dieses analog kodierenden Mechanismus erzeugt, welche proportional zur Numerosität zunimmt, sodass immer größere Differenzen zwischen zwei Numerositäten erforderlich werden, um zu einer schnellen und fehlerarmen Diskrimination zu kommen.

Allerdings wurde dieses Modell zur Erklärung von Zeitdauerschätzungen entwickelt und ist daher an der akustischen, ereignisartigen Enumeration orientiert. Der Nachteil des Modells ist daher, dass nicht erklärt wird, wie die zu zählenden visuellen Einheiten gebildet werden. Des Weiteren fehlt eine Verknüpfung mit aufmerksamkeitssteuernden Modellkomponenten. Diese Mängel ließen sich sicherlich durch eine Erweiterung des Modells beheben, sodass auch ein solcherart modifiziertes Akkumulator-Zähler-Modell das Subitizing-Phänomen erklären könnte. Ein solches analoges Diskriminationsmodell ließe sich auch gut mit Diskriminationstheorien in Einklang bringen, die auf dem Weber-Fechner Gesetz oder dem Stevenson'schen Gesetz aufbauen, beispielsweise dem Gesetz des komparativen Urteilens von Thurstone. Modellhaft gehen van Oeffelen & Vos (1982) davon aus, dass eine Anzahl in eine analoge interne Größe übersetzt wird und das Verhältnis der Differenz zwischen der Standardnumerosität und einer Vergleichsnumerosität ausschlaggebend ist. Sollte dieses Verhältnis kleiner als der hypothetische Weber-Bruch für visuelle Numerositäten sein, dann lassen sich die für Subitizing charakteristische hohe Urteilsgenauigkeit und Schnelligkeit der Unterscheidung zweier Numerositäten finden. Van Oeffelen & Vos (1982) ermittelten einen Weber-Bruch von 16.2% (ca. $1/6$), demzufolge die Obergrenze von Subitizing wäre, da 5 von 6 in 50% der Fälle unterschieden werden kann. Vermutlich ist dieser Weber-Bruch etwas zu hoch, da die kleinste verwendete Numerosität 5 betrug und Numerositätsdifferenzen zwischen 1 und 7 variierten, wobei der Weber-Bruch als Mittelwert aus der Regression der Unterschiedsschwellen (ermittelt über eine 2AFC-Methode) auf den Standardreiz bzw. aus der Regression der Wahrscheinlichkeit der richtigen Diskriminationsurteile über den Standardreiz auf das logarithmierte Verhältnis aus maximaler und minimaler Numerosität ($0.5 \cdot \ln(\max/\min)$) ermittelt wurde. Sie ordnen Subitizing als Spezialfall der "span of discrimination" ein, für das das erwähnte Thurstone'sche Modell zugrunde gelegt wurde. Die Unterscheidung von Numerositäten bzw. Numerons erfolgte also nach dem Weber-Fechner Gesetz, wobei allerdings keine Mechanismen der Diskrimination angegeben werden. Dieses Modell stimmt sehr gut mit dem Zähler-Akkumulator-Modell überein. Der Ausgangspunkt ist in beiden Fällen der Umstand, dass die Diskriminierbarkeit zweier visueller Numerositäten von deren Differenz abhängt: je größer die Differenz, desto weniger überlappen sich die intrinsischen Varianzen der "Füllungszustände" und desto genauer und schneller kann diskriminiert werden. Ein weiterer gemeinsamer Grundgedanke ist der, dass die Numerositäten in analog formatierte mentale Größen übersetzt werden. In diesem Sinne ist sowohl das Akkumulator-Zähler-Modell als auch das Thurstone'sche bzw. Weber-Fechnersche Diskriminationsmodell allgemeiner als das FINST-Modell, welches keine unmittelbaren Aussagen über Diskriminationsmechanismen enthält, sondern kapazitative Beschränkungen im Sinne einer begrenzten gleichzeitigen Objektbindung erklärt. Allerdings ist das FINST-Modell auf die visuelle Modalität beschränkt, wohingegen das Akkumulator-Zähler-Modell auch ein akustisches Subitizing erklären könnte. Die Frage also, ob Subitizing ein numerischer oder non-numerischer Prozess ist, wäre entscheidbar, wenn weitere Evidenzen gefunden würden, die für oder gegen eine Modalitätsspezifität von Subitizing sprächen. Wäre Subitizing transmodal, dann würde dies eher für eine präverbale numerische Kompetenz sprechen.

4 Nachweis numerischer Kompetenzen von Säuglingen

4.1 Numerische Kompetenzen bei Säuglingen

Es gibt Hinweise aus der Tierpsychologie (vgl. Davis & Pérusse, 1988), dass das sprachlich vermittelte Zählen eine Teilkompetenz des Quantifizierens ist, die sich beispielsweise in der Wahrnehmung von quantitativen Umgebungseigenschaften wie der Anzahl von Objekten oder Frequenzen von Ereignissen zeigt und die zu entsprechenden Verhaltenskonsequenzen führen kann. Sicherlich basieren diese Quantifikationsprozesse bei Tieren nicht auf symbolisch-linguistischen Kompetenzen, bei Primaten wie Schimpansen ist dies umstritten. Mit dem sprachlich vermittelten Zählen teilen jedoch alle Quantifikationsprozesse die Individuierbarkeit und folglich die Unterscheidbarkeit von Elementen. Wie in Kapitel 3 dargestellt, belegt Subitizing die Existenz prä- bzw. non-verbaler Quantifikationsmechanismen. Allerdings unterscheiden sich die vorgeschlagenen Modelle des non-verbalen Quantifizierens. Einmal ist das Erfassen und Unterscheiden kleiner Objektmengen das Resultat von Segmentations- und Bindungsprozessen, wie im Falle des FINST- und des Object-file Modells. Zum anderen ist es das Resultat eines physiologisch instantiierten Zählers wie im Falle des Akkumulatormodells von Gallistel & Gelman (1992). Eine Zwischenstellung nehmen allgemeinere Diskriminationsmodelle aus der Psychophysik ein, die auf dem Weber-Fechner Gesetz basieren. Diese teilen mit dem Akkumulatormodell die explizite Annahme einer analogen Repräsentation von diskreten Quantitäten, wobei mit zunehmender Anzahl die Varianz der analogen Repräsentate so stark zunimmt, dass nur noch relativ große Anzahlunterschiede wahrnehmbar sind. Die Gültigkeit des Weber-Fechner Gesetzes für die Diskriminierbarkeit von Anzahlen impliziert, dass nur Anzahlen, deren Verhältnis größer oder gleich dem empirisch gefundenen Weber-Bruch ist, relativ schnell und fehlerarm unterschieden werden können. Im Falle der Diskrimination großer Anzahlen mit einem relativen Unterschied größer als der Weber Bruch bedeutet dies, dass die Anzahlen nur approximativ quantifiziert und Urteile nur über das Mehr oder Weniger der Diskriminanda abgegeben werden. Die Diskriminanda "1" und "2" sollten genauso gut diskriminierbar sein wie die Diskriminanda "50" und "100", da ihre relative Differenz jeweils 50% beträgt, obwohl im ersten Falle die absolute Differenz sehr klein ist. Aus der relativen Differenz der Numerositätsdiskriminanda kann nicht geschlossen werden, ob Numerositäten approximativ oder exakt quantifiziert werden. Das einzige Kriterium für die Unterscheidbarkeit von Numerositäten ist, dass sich die Varianz der Urteilsverteilung über einer Numerosität möglichst wenig mit der Varianz der einer anderen Numerosität überlappt. Dennoch gerät im Falle kleinerer Numerositäten das Akkumulatormodell nicht mit den Zählprinzipien in Konflikt (vgl. Gallistel & Gelman, 1992). Alle diese Befunde und Modelle zum Phänomen des Subitizing haben gemeinsam, dass sie sich auf post-counting subitizing beim Menschen beziehen. Alle Versuchsteilnehmer konnten zählen und es kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass die Zählkompetenz nicht doch eine Rolle beim Subitizing spielt; in früheren Arbeiten sahen Gelman & Gallistel (1978) Subitizing sogar als Epiphänomen der Zählkompetenz an.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Entwicklung des Subitizing. Es ist zunächst zu klären, ob es ein precounting subitizing gibt, also ein Subitizing, das vor oder unabhängig von der Zählfertigkeit existiert. Im Bereich der Tierpsychologie herrscht keineswegs Einigkeit darüber, ob es ein Analogon zum Phänomen des Subitizing bei Tieren gibt (Davis & Pérusse, 1988), Miller

(1993) kommt nach einer Erörterung möglicherweise vergleichbarer Untersuchungsansätze gar zum Schluss, dass es etwas dem Subitizing Vergleichbares bei Tieren nicht gäbe, es sei denn, man weiche die grundlegenden phänomenalen Kriterien des Subitizing auf.

Eine Reihe von Studien zu präverbalen numerischen Kompetenzen bei Säuglingen, welche allerdings nicht unmittelbar das Phänomen Subitizing thematisieren, hatten zum Ziel, Vorläuferkompetenzen des Zählens und des Zahlbegriffs bei Säuglingen zu identifizieren. Allerdings lassen sich die bei Erwachsenen verwendeten Methoden nicht ohne weiteres auf die Säuglingsforschung übertragen, so dass zunächst auf methodologische und methodische Aspekte der Säuglingsforschung eingegangen werden soll, bevor die Frage nach den möglichen numerischen Kompetenzen von Säuglingen näher erörtert wird.

4.2 Methodologische und methodische Aspekte der Säuglingsforschung

4.2.1 Grundsätzliche methodologische Überlegungen zur Säuglingsforschung

Kompetenzen sind diejenigen organismus- oder personinternen Dispositionen, bei bestimmten Anforderungen oder Gegebenheiten bestimmte beobachtbare Zustandsänderungen oder (Sprech-) Handlungen zu zeigen, wobei man letztere mit dem Wort Performanz oder Performanzen zusammenfassend bezeichnet. Kompetenzen unterscheiden sich von den allgemeineren Dispositionen dadurch, dass sie sich primär auf Leistungshandlungen beziehen. Im folgenden soll der Begriff "Performanz" Leistungs-handlungen und der Begriff "Kompetenz" diejenigen Dispositionen bezeichnen, die zur Erklärung von Performanzen verwendet werden. Kompetenzen sind allgemeine Begriffe, die sich innerhalb eines theoretischen Netzwerkes erklären lassen, wie beispielsweise "Intelligenz" oder "Sprachfähigkeit" nur im Rahmen einer Theorie der Intelligenz oder einer Theorie der Sprache und der Kommunikation bestimmt sind. Daher können Kompetenzen nicht vollständig definiert werden (vgl. Pawlowski, 1980). Zwar lässt sich im Rahmen einer Nominaldefinition die Wortbedeutung von "Intelligenz" oder "Zählen" erläutern, indem bedeutungsähnliche Wörter herangezogen werden. Aber eine vollständige Realdefinition würde implizieren, dass man eine vollständige Liste aller beobachtbarer Performanzen angeben könnte, die eindeutig der zu definierenden Kompetenz unter- oder zugeordnet werden können. Da jedoch eine unendliche Anzahl von Performanzvarianten möglich ist, man denke an die Menge aller wohlgeformten Sätze, muss die Performanz auf eine Leistungsnorm oder ein Leistungskriterium bezogen werden. Meist wird eine operationale Definition der Kompetenz vorgeschlagen, also diejenigen Performanzen sollten eine Kompetenz definieren, die durch bestimmte Untersuchungsverfahren kontrolliert, variierbar und wiederholbar hergestellt werden können. Allerdings lassen sich operationale Definitionen logisch in eine Tautologie transformieren (vgl. Pawlowski, 1980), was bedeutet, dass eine Operation ein Konstrukt indizieren kann oder auch ein anderes. Aus diesem Grunde kann nur aufgrund der Verträglichkeit mit dem nomologischen Netz entschieden werden, wie Performanzen mit den zu untersuchenden Kompetenzen zu verbinden und interpretativ zu gewichten sind. Daher sind keine vollständigen, sondern stets nur partielle Realdefinitionen möglich (Pawlowski, 1980). Theorien mit empirischem Anspruch umfassen daher nicht nur die theoretischen Gegenstände, die erklärt werden

sollen, sondern auch die Relationen zwischen den nicht beobachtbaren theoretischen Konzepten und den beobachtbaren Ereignissen.

Überträgt man diese Überlegungen auf die Frage nach den Kompetenzen des Säuglings, dann wird deutlich, dass die Versuche, diese Frage zu beantworten, einerseits von den psychologischen Theorien über die Kompetenzen von erwachsenen Menschen, andererseits von Theorien über deren Entstehen und Veränderung über die Lebensspanne bestimmt werden. Betrachtet werden im folgenden vor allem die intellektuellen oder kognitiven Kompetenzen in einem sehr weiten Sinne. Sie umfassen sowohl Erkennungsfunktionen im engeren Sinne, z.B. Identifizieren, Unterscheiden, Klassifizieren oder Denken, als auch emotionale Bewertungs- und motivationale, volitionale Antriebs- und Verhaltensregulationsprozesse. Kompetenzen werden durch Performanzen identifiziert, womit sich die Frage nach den Performanznormen des Säuglings stellt, wobei zwischen deskriptiven und kausalgenetischen Aspekten unterschieden werden sollte.

Deskriptiv bietet sich der Weg der Alltagspsychologie an, den humanen Säugling mit den humanen Erwachsenen zu vergleichen. Aus dem naiven, meist pragmatisch adäquaten Verständnis unserer eigenen kognitiven Kompetenzen lassen sich dann Aussagen des Typs "Der Säugling kann nicht x, der Säugling kann aber y" ableiten. Heuristisch hat dieses Vorgehen mehr Vorteile als Nachteile, denn schließlich sind die Unterschiede zwischen Säuglingen und Erwachsenen ganz offensichtlich. Man kann mit dem Säugling nicht vermittelt Semantik und Syntax der Sprache kommunizieren und daher nicht die sprachgebundenen Möglichkeiten nutzen, um Informationen über die kognitiven Kompetenzen zu gewinnen. Alle Möglichkeiten der sprachlichen Instruktion von Versuchsteilnehmern entfallen. Die meisten psychologischen Untersuchungen, ausgenommen teilnehmende Beobachtungsverfahren oder Registrierung von Verhaltensspuren, sind darauf angewiesen, mit Hilfe der Sprache die Versuchsteilnehmer zu bestimmten Verhaltensweisen zu bringen. Über die sprachliche Instruktion werden die Versuchsteilnehmer auch motiviert, im Sinne des Versuchs zu handeln. Das human-psychologische Experiment unterscheidet sich von den anderen durch das Vorherrschen der sprachlich vermittelten Instruktion und ist als eine hochgeregelte Form der sozialen Kooperation und Kommunikation aufzufassen. Nicht zuletzt das Teilen von Bedeutungen und sozialen Kodes bedingt die hohe Reaktivität der Versuchspersonen im psychologischen Experiment. Auf ähnliche Probleme der Messreaktivität stößt die Physik erst im Bereich der Elementarteilchen. Da die Wirksamkeit der willkürlichen Variation in der Säuglingsforschung durch die Instruktion nicht sichergestellt ist, müssen analog zu tierpsychologischen Untersuchungen Methoden der Umgebungsänderungen angewendet werden, die dann daraufhin zu prüfen sind, ob sie systematisch mit beobachtbaren Verhaltensänderungen des Säuglings, z.B. Augenbewegungen, kovariieren.

Der rein deskriptive Vergleich von körperlichen und psychischen Phänomenen bei Erwachsenen und Säuglingen liefert erste Informationen. So können beispielsweise aus dem anatomischen Aufbau der Augen und des Kopfes beim Säugling erste Rückschlüsse auf elementare Prozesse wie die Sehschärfe, die Wahrnehmung von Tiefe oder das Richtungshören gezogen werden (vgl. Bower, 1978). Nicht nur im Vergleich mit Erwachsenen, sondern auch im Vergleich mit manchen neugeborenen Tieren fällt die große Unselbständigkeit des humanen Säuglings auf, der sich in den ersten Monaten nicht fortbewegen und nicht selbst ernähren kann sowie kaum gegen Schwankungen des äußeren Milieus geschützt ist. Schon diese Analyse zeigt, dass eine auf den Säugling fixierte Säuglingspsychologie methodisch für viele Fragestellungen unverzichtbar ist und bei manchen

Fragestellungen wie der Prüfung sensorischer Funktionen, völlig ausreicht, theoretisch aber unvollkommen bleibt. Deskriptiv lässt sich ermitteln, welche Verhaltensweisen und welchen Grad physiologischer Reife ein Säugling eines bestimmten Alters zeigt. Diese Verhaltensweisen und physiologischen Parameter lassen sich so inventarisieren, dass sie als empirische Norm beispielsweise in der Pädiatrie herangezogen werden können. In der Psychologie kann jedes beim Erwachsenen zu beobachtende psychische Phänomen daraufhin geprüft werden, ob es sich auch bei Säuglingen finden lässt, ab wann und in welcher Weise. Die Problematik der Identifizierbarkeit komplexerer psychischer Phänomene beim Erwachsenen, z.B. bewusstes Nachdenken, überträgt sich auf den Säugling. Da der Säugling nicht spricht, steht man vor ähnlichen Problemen wie in der Tierforschung, wenn es um die Frage geht, ob Tiere Bewusstsein haben (z.B. Dawkins, 1994). Analog zum Problem eines (mentalistischen) Anthropomorphismus in der Tierpsychologie stellt sich das Problem des "Adulto-zentrismus", also das mentale Leben des Säuglings so zu deuten, wie man das bei sich selbst und seinen erwachsenen Mitmenschen interpretiert. Bevorzugt werden in der Säuglingsforschung Phänomene aus der Wahrnehmungspsychologie untersucht. Psychophysische Paradigmen wurden erfolgreich aus der Wahrnehmungspsychologie in die Säuglingsforschung übertragen und werden in mehreren Handbüchern älteren und neueren Datums zusammenfassend referiert (z.B. Cohen & Salapatek, 1975a, b; Salapatek & Cohen, 1987a, b; Berthenthal & Clifton, 1998; Haith & Benson, 1998), wobei die methodischen Voraussetzungen dieser Übertragbarkeit weiter unten erörtert werden. Die wahrnehmungspsychologischen und psychomotorischen Fragestellungen dominieren nicht zuletzt deswegen, da sich diese Bereiche non-verbal durch Beobachtung untersuchen lassen. Methodologisch bleiben diese Ansätze jedoch der Allgemeinen Psychologie verpflichtet, da sie herangezogen werden, um die allgemeinen Funktionsmechanismen von Sinnessystemen besser zu verstehen. Die Daten aus der Säuglingsforschung werden sehr häufig im Zusammenhang mit Fragestellungen der Allgemeinen Psychologie interpretiert.

So wichtig die deskriptive, inventarisierende Vorgehensweise der Säuglingsforschung ist, um empirisch fundierte Performanznormen zu haben, aufgrund deren Säuglinge hinsichtlich ihrer psychophysischen Funktionen sowie deren Entwicklung diagnostiziert werden und somit eventuell frühe Interventionen möglich sind, so ergänzungsbedürftig ist diese Vorgehensweise aus entwicklungspsychologischer Sicht. Der Vergleich zwischen Säuglingen und Erwachsenen ist ein Extremgruppenvergleich: die Schwäche dieser Heuristik liegt im Verständnis des Säuglings als (noch) extrem inkompetenter Erwachsener. Dieser Interpretationsfehler kommt dadurch zustande, dass im Schluss vom Erwachsenen auf den Säugling dieser als Mängelwesen konzeptualisiert wird. Die Entwicklungspsychologie muss erklären, wie es zur Beseitigung dieser "Mängel", wie es zur Veränderung des Säuglings hin zum Erwachsenen kommt. In diesem Vergleich ist eigentlich eine Entwicklungsnorm impliziert, mit dem normalen Funktionsstatus des Erwachsenen als diejenige Norm, auf die hin die Veränderungen ablaufen sollten. Daher muss die deskriptive Vorgehensweise der Säuglingsforschung durch eine kausalanalytische ergänzt werden, in deren Mittelpunkt die Frage nach den Mechanismen und den Kräften der Veränderung steht. Dies ist eine genuin entwicklungspsychologische Frage.

Die Veränderung psychischer Prozesse ist allerdings ein Leitthema der gesamten Psychologie, wobei sich die Arbeitsteilung neben unterschiedlichen Inhaltsbezügen an den unterschiedlichen Zeitdauern orientiert. Die Veränderung psychischer Prozesse lässt sich in der aktualgenetischen Analyse der Perzeptbildung im Millisekundenbereich untersuchen oder im Bereich von Minuten oder Stunden in der Lern- und Gedächtnispsychologie, so dass letztlich die gesamte Zeitspanne von wenigen Millisekunden bis zu vielen Jahren vom Begriff der psychischen Veränderung umfasst wird. Die ubiquitäre Verwendung des Wortes "Prozess" in der Psychologie ist der Ausdruck dafür, dass eigentlich jede psychische Variable zeitindiziert ist und zeitindiziert gelesen werden sollte. Allerdings dominiert in der psychologischen Modellbildung das Denken in statisch gedachten Strukturen.

Für die Entwicklungspsychologie hat es sich als zweckmäßig erwiesen, Fragen nach der Veränderung des Psychischen, die zugleich Fragen nach der psychischen Stabilität und Konstanz sind, über die Lebensspanne zu dimensionieren und sich als Psychologie der Veränderung innerhalb dieses Zeitraums zu verstehen (Baltes, 1990). Allerdings finden sich in den unterschiedlichen Lebensaltern unterschiedliche Veränderungsdynamiken. In den ersten Lebensjahren ist es sinnvoll, Monate, Wochen oder gar Tage als Zeiteinheit zu verwenden, während das im Erwachsenenalter nur bezüglich bestimmter Fragestellungen, wie z.B. der Gedächtnispsychologie sinnvoll erscheint. Sehr häufig wird in der Entwicklungspsychologie eine am Lebensalter orientierte Teilinventarisierung von Performanzen und Kompetenzen durchgeführt, die entweder querschnittlich unterschiedliche Altersgruppen zu einem Zeitpunkt oder seltener längsschnittlich eine Gruppe (Kohorte) zu unterschiedlichen Alterszeitpunkten erfasst. Querschnittlich erfolgende Inventarisierungen von Performanzen unterschiedlicher Altersgruppen liefern Hypothesen über Veränderungen im Lebenslauf, aber keine Modelle für Veränderungen. Die Datenlage auch in der längsschnittlichen Analyse ist so beschränkt, dass stets mehrere Modelle miteinander verträglich sind. Die häufig sehr großen Zeitintervalle zwischen den Beobachtungszeitpunkten bilden die Veränderungen nur grob ab, so dass Interpolationen nur auf Basis theoretischer Vorannahmen durchgeführt werden können. Die zeitlichen Konfundierungen psychischer Veränderungen mit Lebensalter, Geburtskohorte und Messzeitpunkten können zwar abgeschätzt werden, es bleibt aber das prinzipielle methodologische Problem, dass die Zeit keine Wirkgröße und nicht randomisierbar, und damit prinzipiell nur bedingt kontrollierbar ist. Hat die Psychologie im Bereich kurzfristiger Dynamik auch gewisse Fortschritte auch in der Modellbildung erzielt (Thelen & Smith, 1994), so steht im Bereich längerfristiger Veränderung eine elaborierte Theorie komplexer Veränderungsmechanismen noch aus (vgl. Elman et al., 1996).

Eine entwicklungspsychologische Säuglingsforschung muss also über das deskriptive Inventarisieren von Performanzen und Kompetenzen hinausgehen und die Frage nach den Kräften und Mechanismen der Veränderung stellen. Die Frage nach den Kräften und Mechanismen der Veränderung psychischer Funktionen rückte in den letzten Jahren wieder verstärkt in den Vordergrund, nachdem sie vor allem Piaget, aber auch schon H. Werner und die Pioniere der Evolutionstheorie wie Darwin, schon als eminent wichtige Forschungsfrage bearbeitet hatten. Vor allem Karmiloff-Smith (1992) betont in enger Anknüpfung an ihren Lehrer Piaget, dass eine "developmental cognitive science" nötig sei, in deren Mittelpunkt die Mechanismen von Veränderungen stehen müssen, mit denen das Funktionieren kognitiver Prozesse besser verstanden

werden kann. In diesem Ansatz spielen das Alter und die Zeit als Variablen der Entwicklungspsychologie keine dominierende Rolle mehr, es sind reine Hilfsvariablen. Die zentralen Fragen gruppieren sich nicht mehr um die Beschreibung von Altersunterschieden und zeitlich unterscheidbaren Phasen, sondern um das Problem, warum überhaupt Entwicklung als zielgerichtete Veränderung stattfindet.

Hier stimmt Karmiloff-Smith mit Piaget überein: Der Begriff der kausalgenetischen Veränderung ist zwar nomisch mit der Zeit korreliert, die Zeit an sich bewirkt aber nichts, sondern Etwas geschieht in der Zeit.⁴ Für die Kausalgenese von Veränderungen spielt es jedoch nur eine untergeordnete Rolle, in welchem Alter was wie lange zu beobachten ist, solange die Sequenz dieses Auftretens konstant ist. Es wird also die Ordnungslogik des Auseinander-Hervorgehens betont und nicht Lebensalter und Dauer. Daher ist die Kritik an Piaget in der Form, "Performanz x oder Kompetenz y treten aber schon früher auf als Piaget das annahm" hinfällig, da sie den Kern seines Entwicklungsmodells nicht treffen. Viel kritischer sind Fragen nach den Mechanismen, die diese Stufensequenz instantiieren, nach der Güte der Indikatoren der Stufen und nach der Verallgemeinerbarkeit dieser Entwicklungssequenz über Personen, Situationen, psychische Funktionen sowie Leistungs- und Wissensdomänen (vgl. Karmiloff-Smith, 1992)

So stellt sich die Frage nach den Kompetenzen des Säuglings in der kausalgenetisch orientierten Entwicklungspsychologie anders: Der Säugling ist keineswegs der mangelhaft ausgestattete, unvollkommene kleine Erwachsene, sondern wie alle anderen biologischen Organismen mit basalen Kompetenzen zu adaptiven Veränderungen ausgestattet. Insofern wird nicht mehr die Diskrepanz zu den Erwachsenen betont, sondern angelehnt an nativistische Positionen werden Startkompetenzen wie die zu adaptiver Veränderung oder zum Lernen hervorgehoben (z.B. Spelke et al., 1992; Spelke & Newport, 1998). Begünstigt wurde diese Verschiebung des Akzentes durch Arbeiten, die konsequent vom kompetenten Säugling ausgingen (Stone, Smith, & Murphy, 1974). Diese Auffassung des Säuglings war zunächst eine Gegenbewegung auf die Einschätzung, die aus dem naiven Vergleich von Säuglingen mit Erwachsenen resultierte. Sie wurde durch die erfolgreiche Herstellung und Anwendung neuer Methoden in der Säuglingsforschung begünstigt, mit denen gezeigt werden konnte, dass Säuglinge eine Fülle von Wahrnehmungs- und Koordinationsleistungen erbringen können. Die Vorstellung vom Säugling als chaotisch operierendem Reflexbündel wurde aufgegeben und die sinnvolle, biologisch und psychologisch zweckmäßige Eigenaktivität des Säuglings betont. Doch Kritiker wiesen vor allem in den 90er Jahren darauf hin, dass auch diese Auffassung vom "kompetenten" Säugling auf einer Inventarisierung von Fakten und Performanzen beruht, ohne dass Theorien zu diesen frühen Kompetenzen aufgestellt wurden (z.B. Rutkowska, 1993; Haith, 1993). Die Auffassung des Säuglings als kompetentes Wesen hatte sich aus einer angeblich entgegengesetzten Überzeugung Piagets ausgebildet, die Säuglinge hätten im Stadium der sensumotorischen Intelligenz keine Repräsentationen. Allerdings konnte das Modell des kompetenten Säugling genauso wenig wie die Piaget'sche Theorie hinreichend erklären, wie sich beim Neugeborenen und Säugling die Repräsentation der äußeren Welt entwickelt. Piaget ließ dies im Ungefähren und sah im sensu-

⁴Die für die Naturwissenschaften konstitutive Kausalanalyse verwendet zeitrelative Begriffe wie "Wirkung" und "Ursache", die auf Probleme der Messung von Gleichzeitigkeit hinweisen, sowie die Begriffe "Ereignis" und "Zustand". Der theoretische Begriff "Kraft" lässt sich nur über die Messung von Zustandsänderungen operationalisieren.

motorischen Funktionskreislauf die Ausgangsbedingung dieser Repräsentation, wobei er sich erst im Zusammenhang mit der präoperatorischen Phase detaillierter über deren Genese äußert (vgl. Rutkowska, 1993)

4. 2. 2 Prämissen der kognitionspsychologischen Säuglingsforschung

Die Verbesserung der Methoden der Säuglingsforschung seit den 50er Jahren erlaubte eine weitergehende Bearbeitung basaler Fragen wie der nach den angeborenen Kompetenzen des Säuglings, die im Zusammenhang mit neokonnektionistischen Modellen und Selbstorganisationstheorien gegenwärtig theoretisch rekonzeptualisiert werden (vgl. Elman et al., 1996). Die Methoden bestimmen nicht nur die Interpretationen der Befunde, sondern implizieren auch Annahmen über die psychischen Funktionen der Säuglinge. Deswegen sollen im folgenden wesentliche psychologische Annahmen einiger grundlegender Methoden der Säuglingsforschung skizziert werden. Die Details dieser Methoden werden in englischsprachigen Handbüchern zur Säuglingsforschung diskutiert, vor allem in dem etwas älteren Sammelwerk von Gottlieb und Krasnegor (1985), dessen Aufsätze die Diskussion über allgemeine methodische Probleme der Säuglingsforschung gut widerspiegeln.

Die meist nicht explizierte Grundvoraussetzung der psychologischen Säuglingsforschung ist diejenige, den Säugling ebenso wie den Erwachsenen als informationsverarbeitendes System anzusehen (Leslie, 1991). Schon das Neugeborene verfügt über alle Sinnessysteme, die ihm ermöglichen, Informationen aus der Umwelt aufzunehmen, und über motorische Effektorsysteme, um auf die Umwelt einzuwirken. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit und -genauigkeit ist gering und es ist davon auszugehen, dass die Kooperation der Sinne nur unvollständig ausgeprägt ist. Diese Annahmen sind Gegenstand der sinnespsychologisch orientierten Säuglingsforschung. Sicherlich verfügt der neugeborene Säugling nicht über die Erfahrungen, die beim Erwachsenen elementare Analyse- und Syntheseprozesse beeinflussen. Da die Verknüpfungen aus Sinnes- und Erfahrungsrepräsentationen noch rudimentär sind, ist von eingeschränkten Erkennungsleistungen auszugehen. Neurophysiologische und psychophysische Studien zeigen jedoch, dass schon unmittelbar nach der Geburt die Stimulation der Sinne zur Gedächtnisbildung führt (Papousek, 1977). Es ist sogar davon auszugehen, dass schon im Mutterleib gelernt wird, wie Studien zur Diskrimination der Stimme der Mutter von Stimmen fremder Personen belegen (DeCasper & Spence, 1986). Informationen werden nicht nur aufgenommen, sondern auch transformiert und als Schemata im Gedächtnis angelegt, die auf die weitere Informationsaufnahme und -transformation zurückwirken. Das Ungeborene nutzt schon im Mutterleib seine motorischen Organsysteme, die unmittelbar nach der Geburt noch unkoordiniert und reflexgesteuert sind, zunehmend aber mit den Sinnessystemen koordiniert werden (Prechtl, 1974; 1986). Durch neuere Studien wird Piaget dahingehend bestätigt, dass in den ersten Lebensmonaten das Erlernen sensumotorischer Koordinationen dominiert (z.B. Thelen, Skala, und Kelso, 1987). Informationsmodelltheoretisch gesehen verfügt das Neugeborene, aber auch der Embryo in der letzten Phase der Schwangerschaft, über alle Komponenten eines informationsverarbeitenden Systems: Input, Throughput mit Gedächtnisfunktionen und Output mit Rückkoppelungsmechanismen. Kognitionspsychologisch lässt sich die zentrale Aufgabe der Informationsverarbeitung eines Organismus als Aufbau von Repräsentationen seiner Umgebung verstehen, die es ihm ermöglichen,

bei Stimulation zu entscheiden, ob diese von positiver, negativer oder neutraler Valenz ist. Der Organismus muss eine Reihe weiterer wichtiger Unterscheidungen treffen und die entsprechenden Zuordnungen lernen können: Selbst oder Fremd zu unterscheiden, Eigen- oder Fremdbewegung, ob etwas neu oder vertraut ist, wo dieses ist, was dort ist, ob es wichtig oder unwichtig oder ob es bedrohlich oder nicht bedrohlich ist, ob man sich abwenden oder zuwenden soll, ob etwas vor oder nach einem Referenzereignis passiert ist. Recht gut belegt sind die unterschiedlichen neuronalen Substrate des "what-" und des "where"-Systems, also die getrennte neuronale Informationsverarbeitung von Lokations- und Objektinformationen (Trevarthen, 1968, Ungerleider & Mishkin, 1982). Das orientierende Einordnen aller Stimulationen von Außen und Innen in diese polaren, graduell abgestuften Dimensionen setzt psychische Funktionen voraus und erlaubt durch immer feinere Unterteilungen den Aufbau eines komplexen Gedächtnis-, Motivations- und kognitiv-emotionalen Bewertungssystems. Nach Rheingold (1985) besteht die Entwicklung im wesentlichen darin, mit den Umgebungen des Organismus und den organismischen Möglichkeiten, auf jene einzuwirken, vertraut zu werden. Entwicklung bedeutet somit Vertrautheit und Bekanntheit zu erwerben.

Von Bedeutung sind sowohl die diskriminativen als auch die orientierenden Aufmerksamkeitsfunktionen. Letztere sind als Orientierungsreaktion unwillkürlich, da plötzlich auftretende Veränderungen der Umgebungsverhältnisse schnellstens auf ihre Bedrohlichkeit hin geprüft werden müssen. Aus der neuropsychologischen Säuglingsforschung gibt es Hinweise darauf, dass das unwillkürliche Aufmerksamkeits-system früher reift als das willkürliche (Johnson, Posner, & Rothbart, 1991), wobei diese Interpretation problematisch ist, da keineswegs klar ist, welche Methode die Identifikation der willkürlichen Aufmerksamkeit erlauben würde. Die Funktion der Aufmerksamkeit besteht im wesentlichen darin, die informationsverarbeitenden Operationen zu koordinieren, da in einem Zeitintervall nicht mit beliebig vielen Operationen beliebig viele Gegenstände unabhängig voneinander bearbeitet werden können. Insofern ist vermutlich das informationsverarbeitende System nicht deswegen beschränkt, weil es über zu wenig Speicherkapazität verfügt, sondern weil sich innerhalb bestimmter Zeitintervalle nicht beliebig komplexe operative Verknüpfungen vornehmen lassen (z.B. Neumann, 1992). In Abhängigkeit von der Anforderung lässt sich jedoch durch Lernen die operative Komplexität in gewissen Ausmaßen steigern, da Lernen zu einer Reduktion der informationellen Komplexität der Aufgabe führt. Durch Verwendung von Aufgabenbearbeitungsroutinen lassen sich so Verarbeitungsressourcen einsparen, die für zusätzliche Aufgaben zur Verfügung stehen.

4. 2. 2. 1 Orientierungsreaktion und Habituation

Für die Säuglingsforschung ist bedeutsam, dass Säuglinge schon unmittelbar nach der Geburt Orientierungsreaktionen zeigen. Sehr früh wird also gemäß den oben angesprochenen Polaritäten die Umgebung klassifiziert, wobei die Klassifikationen zunächst von Reflexen und Automatismen getragen werden, von denen sie sich dann zunehmend ablösen. Die Orientierungsreaktion eines Säuglings zeigt sich in der schnell auftretenden motorischen Beantwortung eines intensiven, plötzlich auftretenden Reizes. Auf einen Knall hin beispielsweise reagiert der wenige Tage alte Säugling mit dem Drehen des Kopfes oder der Augen in Richtung des Reizes, wobei sich Schnelligkeit und Genauigkeit der Lokalisationsreaktion von Woche zu Woche verbessern (Bower, 1982, Kreidler & Kreidler, 1970).

Außerdem ist ein Zucken der gesamten Körpermuskulatur festzustellen und physiologische Indikatoren wie die Herzschlagfrequenz verändern sich konkordant (z.B. Graham, 1992; Richards & Casey, 1992). Insofern ist die Orientierungsreaktion als basale Komponente kognitiver Prozesse anzusehen. Da der Säugling kaum Erfahrungen mit Stimuli hat und deren Relevanz nicht schnell über die Verknüpfung mit Gedächtniseinträgen erkennen kann, muss er bevorzugt auf Neues achten. Die Orientierungsreaktion (OR) kann als kognitive Leistung gesehen werden, da sie letztlich das Resultat einer Interpretation des Neuigkeitswertes eines Stimulus anhand der genannten Bewertungspolaritäten ist. Dies zeigt sich daran, dass die Wiederholung des Reizes, der die Orientierungsreaktion auslöste, zu einem Rückgang der Reaktionsamplitude, der Reaktionsdauer oder der Reaktion überhaupt führt. Dieser Rückgang der OR auf ein bestimmtes Niveau der anfänglichen Intensität wird als Habituation der OR oder einfach Habituation bezeichnet. Die OR indiziert, dass sich der Organismus orientiert und Passungsdiagnosen vornimmt; die Habituation, dass der Organismus bereits orientiert ist, also die Stimulationsverhältnisse kennt, interpretiert und erkannt hat. Generalisierung liegt dann vor, wenn trotz Variationen eines Reizes keine neue OR, also keine Dishabituation induziert werden kann. Die Variationen eines habituierten Stimulus können entlang verschiedener Ähnlichkeitsdimensionen vorgenommen werden.

Sokolov (1963) schlug ein neuronales Modell vor, um die Auslösung einer OR zu erklären, da diese letztlich die Entscheidung darüber, ob ein Reiz neuartig und explorationsbedürftig ist, indiziert. In der OR drückt sich auch die Präferenz für einen bestimmten Stimulus aus, denn zahlreiche andere, gleichzeitig stattfindende Stimulationen bleiben unbeachtet. Sokolovs Annahme bestand im wesentlichen darin, dass zu jedem Reiz ein neuronales Modell als neuronale Repräsentation gehört, welche gespeichert wird. Eine OR wird dann ausgelöst, wenn ein Reiz nicht mit dem neuronalen Modell übereinstimmt. Die grundlegende Annahme dieses Komparatormodelles ist also, dass fortlaufend Passungsdiagnosen durchgeführt werden, inwieweit eingehende Stimulationen zu gedächtnismäßigen Repräsentaten vorausgehender Stimulation passen ("matching"). An dieser Stelle sei auf das Höföding-Problem verwiesen, denn die eingehende Stimulation muss auf ihre Ähnlichkeit hin mit den Repräsentaten vergangener Stimulationen geprüft werden. Die Annahme von basalem Ähnlichkeitslernen, über die schon einfachste Organismen verfügen müssten, erscheint daher auch in diesem Kontext zweckmäßig. Entsprechend indiziert die Habituation auch eine Gedächtnisleistung, die mehrere Tage nachweisbar sein kann (Fagan, 1973), wobei Rovee-Collier (1987) meint, dass die Habituation nur sehr begrenzt als Gedächtnismaß interpretierbar ist. Edelman (1998) zeigt recht überzeugend, dass ohne das Konstrukt der Ähnlichkeit das Funktionieren psychischer Prozesse unverständlich ist, beispielsweise die für die Tektonik der Kognition essentiell wichtigen Kategorisierungsprozesse und Bezugssystembildungen (vgl. Medin, Goldstone, & Gentner, 1993; Goldstone, 1994). Allerdings wird in dem Sokolov'schen Modell angenommen, dass von fast jedem eingehenden Reiz eine exakte neuronale Modellkopie angelegt wird. Ohne zusätzliche Annahmen, wie sie beispielsweise Logan (1988) getroffen hat, um die Automatisierung von Fertigkeiten zu erklären, kann das Sokolov'sche Modell das Phänomen der Generalisation letztlich nicht erklären. So ist bekannt, dass ein neuartiger, unkonditionierter Stimulus in einen konditionierten Stimulus transformiert werden kann und keine OR mehr auslöst. Wenn von jedem Reiz ein neuronales Modell angelegt wird, kann ohne spezifische Annahmen über einen Modellselktionsmechanismus nicht verstanden werden, warum vertraute Reize sehr schnell wiedererkannt werden. Weiterhin bleibt unklar, warum bis zu

einem gewissen Grade ähnliche Reize keine OR auslösen, also generalisiert wurde. Dies legt nahe, dass ein neuronales Modell selegiert wird, wahrscheinlich auf der Ebene der Reizmerkmale. Kreidler & Kreidler (1970, 1972) schlagen deshalb in der Tradition der Schematheorie vor, von Schemata anstatt von neuronalen Modellen zu sprechen. Als wesentliches Argument bringen sie vor, dass oberhalb der Einzelreize eine Repräsentationsform angelegt sein muss, mit der selektive Orientierungsphänomene und Passungsprüfungen sparsamer erklärt werden. Auch das Phänomen der Generalisation kann auf der Ebene von Einzelreizmodellen nicht erklärt werden, da nicht auf Einzelreize, sondern auf Reizklassen oder gar Kategorien reagiert wird. Die Tatsache, so Shepard (1987), dass kein Individuum jemals das selbe Objekt oder die selbe Situation zweimal wahrnimmt oder erfährt, ist ein guter Grund, im universellen Gesetz der Generalisierung das erste Fundamentalgesetz der Psychologie zu sehen. Daraus entwickelt Shepard im folgenden das Konzept eines metrischen repräsentationalen Raumes, das konsequent dem Gedanken folgt, dass erkennendes Wahrnehmen in einer metrischen Ähnlichkeitsskalierung besteht. Im Prinzip wird hier das Konzept des eindimensionalen Bezugssystems auf einen n -dimensionalen Fall generalisiert (zur Bezugssystemforschung vgl. Witte, 1966; Heller, 1980; Zoeke & Sarris, 1983; Schüle, 1984).

Ohne Bildung von Stimulus- und Reaktionsäquivalenzklassen und ohne selektive Passungsprüfungen ist kaum ein effektiver Lernmechanismus vorstellbar. Lernen beruht darauf, dass Korrespondenzen zwischen Reiz und Schema erwartet werden. Wird jedoch eine bestimmte Toleranzzone überschritten und etwas als diskrepant diagnostiziert, dann sind neue Diagnosen und Bewältigungsaktionen zu realisieren oder neue Informationsgewinnungs- oder Problemlöseprozesse zu starten. Die Grundstruktur eines solchen Lernvorganges ist kybernetischer Natur und lässt sich Hoffmann (1993) zufolge als antizipative Verhaltenssteuerung plausibel modellieren, zumal diese Grundstruktur in so gut wie jeder Lern- und Kognitionstheorie vertreten ist. In einem sehr weiten Sinne ist dies die Grundstruktur des Lernens am Erfolg, des lernenden Aufbaus der Verhaltensorganisation durch Rückkoppelungsprinzipien (Powers, 1977). Beim Lernen am Erfolg wird die Diskrepanzdiagnose allerdings anders induziert. Sie kommt dadurch zustande, dass der antizipierte Effekt einer Aktion nicht eintritt und neue Aktionen in Gang gesetzt werden müssen. Schon Selz (1913) wies auf die unverzichtbare Annahme eines antizipatorischen Schemas hin, das in Form von Produktionssystemen auch in der Kognitionspsychologie eine große Rolle spielt (Mack, 1998). Annahmen, die auch Piaget in seinem Äquilibrationsmodell formuliert hat, dem zufolge akkommodativ neue Schemata entwickelt werden müssen, wenn die Assimilation von Reizen oder Anforderungen nicht gelingt, wobei Piaget betont, dass Assimilation und Akkommodation nie getrennt voneinander vorkommen (Piaget, 1983). Diese Modelle betonen den Primat der Eigenaktion im Prozessgefüge der Kognition (zur Rolle der Motorik im Prozessgefüge der Kognition vgl. Prinz (1983)). Das Modell der OR-Habituation weicht in gewisser Weise von den sensumotorischen Modellen ab, da die Passungsprüfungen nicht primär motorisch vermittelt sind. Bei der OR-Habituation scheinen die Reizwiederholungen und nicht die Reaktionen ausschlaggebend zu sein. Wenn nach einer Serie gleichlauter oder gleichlanger Töne plötzlich ein lauterer oder längerer auftritt, dann bemerken Säuglinge dies genauso wie Erwachsene auch ohne motorisch vermittelte Effektantizipationen. Offensichtlich erlauben Wiederholungen gleichartiger Ereignisse die Antizipation von künftigen, in dieses Schema passenden Ereignissen. Ein ähnliches Erwarten von Ereignisregelmäßigkeiten lässt sich im Bereich des impliziten Lernens von artifiziellen Grammatiken oder sonstigen hierarchisch-sequentiellen Regelmäßigkeiten, auch

sequentiellen Abhängigkeiten höherer Ordnung, beobachten. Es ist sicherlich nicht ausschließlich über die Antizipation eigener Aktionseffekte gesteuert, sondern lässt sich als Lernen durch Antizipieren von gleichartig strukturierten Ereignissen oder Ereignissequenzen konzeptualisieren, wobei die zeitliche Erstreckung komplexer verschachtelter rekursiver Ereignisgruppen der Extraktion solcher Regelmäßigkeiten Grenzen setzen dürfte.

Entsprechend lässt sich eine kognitivistische Interpretation des OR-Habituations-Modells wie folgt skizzieren: Jede Repräsentation eines neu aufgenommenen Stimulus wird automatisch hinsichtlich seiner Passung mit der Repräsentation zuvor eingegangener Reize geprüft. Jede Diskrepanz (“mismatch”) bedeutet eine Veränderung der Stimulation und führt dazu, dass Prozesse beginnen, welche Polaritäten abprüfen, weitere Schemata aktivieren oder auch sequentielle Suchprozesse anstoßen (dieser mismatch lässt sich auch im EEG bei Säuglingen in Form kontingenter negativer Variationen feststellen, vgl. Cheour, Leppanen, und Kraus, 2000). Kann keine Schnittmenge zwischen der Reizrepräsentation und den Schemata hergestellt werden, dann wird, so Kreidler & Kreidler (1970), eine OR ausgelöst. Kreidler & Kreidler (1970) betonen: “Whatever may be the precise rules guiding selective matching, the process must be defined as cognitive, both in accordance with our own definition as well as in line with definitions inherent in the works of Bruner, G. Miller, Neisser and others. For without assuming a kind of selective matching for meaning attainment, it seems impossible to account for the organism’s ability to determine whether a stimulus is sufficiently novel and/or significant, so as to require an OR response. In other words, the existence of the OR *presupposes* cognition” (S. 102f.). Kreidler & Kreidler schließen daraus, dass damit die OR die niedrigste Ebene der Kognition sei und folgern: “Since conditioning and obviously higher forms of learning presuppose the OR, and since the OR presupposes at least a rudimentary cognitive activity, it can no longer be claimed that these cognitive activities are acquired by learning and are secondary in nature” (S. 103). Meines Erachtens kann man aber nicht Lernen von Kognition trennen, denn der Lernvorgang ist kognitiver Art. Er besteht in der bewertenden Rückbeziehung eines Zustandes auf einen vorausgehenden oder einen Referenzzustand und in der induktiven Inferenz (“Antizipation”) eines gleichartigen künftigen Ereignisses (Staddon, 1988), so dass Lernen eine dynamische Form der Regelung eines Sollwertes ist (Bischof, 1995). Lernen setzt also eine den Toleranzbereich überschreitende Erkennungs- oder Aktionsdiskrepanz voraus, da das antizipierte Ereignis oder der antizipierte Aktionseffekt nicht eintreten. Eine solche Antizipation setzt allerdings eine diese Antizipation ermöglichende Struktur, beispielsweise ein Schema, voraus. Die Korrektur der Diskrepanz kann entweder reproduktiv oder assimilativ durch die Verwendung bekannter Strukturen oder produktiv oder akkommodativ durch die Herstellung neuartiger Strukturen erfolgen (Selz, 1924; Piaget, 1948).

4. 2. 3 Skizze einiger basaler Methoden der Säuglingsforschung

Die methodischen Möglichkeiten der Säuglingsforschung korrespondieren gut mit psychologischen Grundannahmen über mögliche kognitive Basisfunktionen bei Säuglingen. Es kann also von einer angemessenen Konstruktvalidität dieser Methoden ausgegangen werden, auch wenn einzelne Methodenvarianten oft fragwürdig erscheinen oder Interpretationen der gewonnenen Befunde weit über die Datenlage hinauszugehen scheinen (vgl. Haith, 1998). Drei grundlegende methodische

Ansätze bestimmen das Methodenrepertoire der kognitionspsychologisch orientierten Säuglingsforschung: die Methode der Präferenzen, die Methode der Habituation und die Lernmethoden; sie beziehen sich auf die Habituation, das Generalisations- und Diskriminationslernen.

4. 2. 3. 1 Die Methode der Präferenzen

Zeigt man einem Säugling simultan zwei unterschiedliche Stimuli, und fixiert der Säugling einen der beiden Stimuli länger als den anderen, so kann davon ausgegangen werden, dass der Unterschied erkannt wurde. Obwohl bereits Valentine (1914) diese Methode des präferentiellen Fixierens verwandte, um die Farbwahrnehmung sehr junger Kinder untersuchen zu können, wurde diese Methode erst ab dem Ende der fünfziger Jahre zu einer Standardmethode in der experimentellen Säuglingsforschung (Fantz, 1958; Berlyne, 1958; Spelke, 1985). Die Methode des simultanen visuellen Paarvergleiches wird verwendet, um präexperimentell vorhandene Präferenzen für bestimmte Stimuli zu ermitteln und so auf diejenigen Merkmale von Stimuli schließen zu können, die deren Attraktivität ausmachen. Werden Dauer und Seitenlokation der Präsentation kontrolliert, dann lässt sich einigermaßen zuverlässig darauf schließen, dass Säuglinge in den ersten Lebensmonaten einen moderat komplexen Stimulus im Vergleich zu einem sehr einfachen, homogenen oder einem sehr komplexen, vielfach gemusterten Stimulus bevorzugen (z.B. Cohen, DeLoache, & Rissman, 1975). Diese Tendenz lässt sich nutzen, um die Sehschärfe von Säuglingen zu bestimmen (Teller et al., 1986). Bei Kindern, die bereits ausreichend Kontrolle über ihre Arm- und Greifbewegungen haben, lässt sich auch die Methode des präferentiellen Greifens realisieren, bei der innerhalb des Greifraums des Säuglings unterschiedliche Auswahlmengen präsentiert werden. Gemessen werden kann, welches Objekt zuerst in die Hand genommen wurde oder, wie in den Untersuchungen zum A-nicht-B-Fehler, ob ein verdecktes Objekt aus dem richtigen Versteck geholt wird, oder wie in der object-examination-task, wie lange in welcher Weise innerhalb einer vorher festgelegten Zeit ein Objekt exploriert wird (z.B. Mandler & McDonough, 1998a,b).

Neben dem simultanen visuellen Paarvergleich wird häufig das Überraschungs- bzw. Familiarisierungs-Neuartigkeitsparadigma verwendet, das aus einer Familiarisierungs- und einer Testphase besteht. Der Säugling wird zunächst mit einer Reihe von Stimuli vertraut gemacht, indem z.B. ein Stimulus für eine fixe Zeit oder so lange dargeboten wird, bis der Säugling diesen für eine vorgegebene Zeit beachtet hat, dann wird der nächste Stimulus nach dem gleichen Muster präsentiert. (Dieses Vorgehen wird "infant control procedure" genannt, da der Säugling die Geschwindigkeit bzw. Dauer der Präsentation der einzelnen Reize steuert; beachtet der Säugling einen Reiz eine vorgegebene Zeit lang nicht, wird der nächste Stimulus präsentiert oder bei längerer Nichtbeachtung der Versuch abgebrochen (vgl. Colombo & Horowitz, 1985). In der Testphase wird ein neuer Stimulus simultan oder sukzessive mit dem alten präsentiert; als Maß wird die Dauer der Fixation der Stimuli ermittelt, wobei die Art der Präsentation der Teststimuli derjenigen der Familiarisierungsstimuli gleicht. Aus der ungleichen Aufmerksamkeitsverteilung zwischen den präsentierten Stimuli wird geschlossen, dass der Säugling Informationen über den alten Reiz aufgenommen, verarbeitet und behalten hat, so dass der neue Reiz als andersartig wahrgenommen wird. Zeigt der Säugling keine statistisch bedeutsame Präferenz für einen der Stimuli, kann allerdings nicht geschlossen werden, daß der

Säugling die Stimuli nicht diskriminieren konnte. Die Neuigkeitspräferenz ist also ein konservatives Maß für die Diskriminationsleistung eines Säuglings.

An dieser Stelle wird deutlich, dass die Präferenzmethoden vom motivationalen Zustand des Säuglings abhängig sind, der nicht verbal instruiert werden kann. Voraussetzung für den Erfolg dieser Methode ist ein wacher, aufmerksamer und interessierter Säugling. Dies setzt voraus, dass sich der Säugling in einem einigermaßen ausgeglichenen Zustand befindet. Ohne ein, zumindest kurzzeitig stabiles emotionales und motivationales Befinden können also kognitive Funktionen des Säuglings nur sehr schwer erschlossen werden. Hinzu kommt, dass Säuglinge keineswegs durchgängig eine Präferenz für einen neuen Stimulus haben, sondern manchmal auch den alt-vertrauten bevorzugen. Da sich aber auch in diesem Falle überzufällig unterschiedliche Aufmerksamkeitsverteilungen zeigen, kann trotzdem auf eine Diskriminationsleistung geschlossen werden. Diese Meinung wird nach Hunter und Ames (1988) von den meisten Säuglingsforschergruppen geteilt und Hunter und Ames schlagen ein Modell vor, in dem die Faktoren Alter des Säuglings, Aufgabenschwierigkeit (Stimuluskomplexität), Dauer und Art der Familiarisierung sowie interindividuelle Unterschiede der Säuglinge einer Altersstufe die Präferenzrichtungen beeinflussen. Können die Säuglinge die Information über einen Stimulus nicht zureichend aufnehmen oder verarbeiten, dann scheinen sie eher die vertrauten Stimuli zu bevorzugen und setzen gewissermaßen die Exploration der zuerst gezeigten Reize einfach fort. Hunter und Ames (1988) betonen die Notwendigkeit, dass beim Verständnis des (visuellen) Explorationsverhaltens des Säuglings das enge Zusammenspiel von Motivation, Emotion und Kognition verstärkt berücksichtigt werden sollte (vgl. auch Slater, 1995). Häufig wird auch versucht, den Säuglingen Ereignisse zu präsentieren, die Erwachsene als physikalisch oder logisch unmöglich interpretieren (vgl. die Arbeiten von Spelke oder Baillargeon, z.B. Spelke, Breinlinger, Macomber, & Jacobson, 1992; Baillargeon, 1995). Zeigen sich die Säuglinge überrascht oder eine Präferenz für das "unmögliche" Ereignis, dann wird auf eine vom Säugling erlebte Erwartungsdiskrepanz zwischen dem gegebenen und dem "normalen" Ereignisverhältnis geschlossen.

Im Bereich der auditiven Wahrnehmung, insbesondere der Sprachsignal-wahrnehmung, wird die Methode des präferentiellen Kopfdrehens ("Head-Turn Preference Procedure", HPP) verwendet (Kemler Nelson, Jusczyk, Mandel, Myers, Turk & Gerken, 1995). Man macht sich zunutze, dass sich Säuglinge durch Drehen des Kopfes in Richtung einer Schallquelle orientieren. Dieses Verhalten kann durch einen interessanten, zum Ton kontingenten visuellen Stimulus aufrechterhalten und stabilisiert werden. Es kann sowohl die Anzahl der Kopfdrehungen als auch die Länge der Blickdauer hin zur Schallquelle gemessen werden. Die Präferenz für einen auditiven Stimulus wird dadurch bestimmbar, dass dem Säugling beispielsweise links und rechts vom Kopf unterschiedliche Schallereignisse dargeboten werden. Die mittlere Differenz der Dauer der Blicke hin zu den beiden Schallquellen kann als Präferenzindex verwendet werden (zu Details einer gut elaborierten HPP-Technik vgl. Kemler Nelson et al., 1995).

4. 2. 3. 2 Die Methode der Habituation

Ein wesentlicher Nachteil der Präferenzmethoden ist, dass sie auf spontan auftretende Reizbevorzugungen beschränkt bleiben. Verändert sich allerdings in einer konstant gehaltenen Umgebung die Stimulation, dann kann bei einem Säugling eine Art OR ausgelöst werden, die sich im

weiteren Sinne auch als eine Art Neuigkeitspräferenz auffassen lässt. Fantz (1964) machte darauf aufmerksam, dass so Stimuluspräferenzen temporär kontrolliert erzeugt werden können. Die Veränderung weniger Stimulationsmerkmale in einer ansonsten konstanten, reizarmen Umgebung wird zu einer erfolgreichen Induktion, wenn der Säugling eine OR zeigt und seine Aufmerksamkeit deutlich erkennbar dem neuen Reiz zuwendet, z.B. durch länger anhaltende Fixation desselben. Wird der Stimulus kontinuierlich länger gezeigt oder wiederholt präsentiert, dann lässt sich ein Abnehmen der Blickzuwendung beobachten, die OR lässt nach und habituiert. Es wird, wie oben dargelegt, angenommen, dass bei Habituation der OR der Stimulus informationsmäßig ausgeschöpft und als vertraut eingestuft wird. Allerdings, dies sei schon an dieser Stelle kritisch angemerkt, wird in der Literatur meist nicht zwischen OR und Aufmerksamkeit unterschieden. Es stellt sich die Frage, ob die OR der klassischen Habituationsparadigmen stets mit den Aufmerksamkeitsveränderungen diverser Studien gleichgesetzt werden kann (vgl. die kritische Diskussion bei Malcuit, Pomerleau & Lamarre, 1988, sowie die zahlreichen Kommentare dazu im selben Heft; Cohen, 1991; Lécuyer, 1989).

Der Rückgang der Aufmerksamkeitszuwendung, gemessen über die Fixationsdauer, kann nicht als einziger Indikator der Habituation verwendet werden, da auch andere Faktoren wie Müdigkeit oder auch periphere sensorische Adaptationsphänomene eine Rolle spielen können. Da aber die Habituation als Phänomen der zentralen Informationsverarbeitung interpretiert wird, müssen sensorischen Adaptationsphänomene ausgeschlossen werden, indem beispielsweise unterschiedlich entfernte Objekte gleicher Netzhautprojektionsgröße verwendet werden, um den Verarbeitungsort der Größenkonstanz einzugrenzen (vgl. z.B. Bower, 1966; Slater, Mattock, & Brown, 1990; Slater, Morison, & Somers, 1988; Slater, Morison, & Rose, 1983). Sensorische Adaptationsphänomene können auch dadurch ausgeschlossen bzw. kontrolliert werden, dass nicht alle Stimulusmerkmale von Präsentation zu Präsentation konstant gehalten werden, z.B. kann die Anordnung von Objekten oder deren Distanz zum Säugling variiert werden. Schließlich wird der Erfolg der Habituationsinduktion dadurch geprüft, dass ein konstant gehaltenes Merkmal des Habituationsstimulus dann verändert wird, wenn der Säugling ein bestimmtes Habituationkriterium erfüllt. Lässt sich wieder eine OR auslösen oder steigt die Dauer der Blickfixation, üblicherweise verglichen mit den letzten zwei oder drei Habituationsdurchgängen wieder deutlich an, kann über diese Dishabituation auf das Erkennen der unterschiedlichen Stimulusmerkmale und eine effektive zentrale Habituation geschlossen werden.

Ein Habituationsexperiment besteht aus einer Habituations- und einer Testphase. Typischerweise wird dem Säugling ein visueller Stimulus, zum Beispiel ein abstraktes Muster präsentiert. Gemessen wird die Blickfixationsdauer, wobei die Habituationsphase beendet wird, wenn die Blickfixationsdauer ein vorher festgelegtes Kriterium erreicht oder unterschritten hat. Üblicherweise wird 50% der durchschnittlichen Blickfixationsdauer aus den ersten drei Habituationsdurchgängen als Kriterium verwendet. Aus praktischen Gründen wird allerdings oft eine maximale Anzahl von Habituationsdurchgängen festgelegt. Bestimmt der Säugling Dauer eines und damit den Beginn des nächsten Habituationsdurchganges z.B. dadurch, dass er mindestens 0,5 Sekunden den Reiz durchgängig fixieren und mindestens 2 Sekunden wegsehen muss, wird dieses Verfahren als säuglingskontrolliert ("infant control procedure") oder visuskontrolliert bezeichnet. Weitere Varianten wären, die Anzahl der Habituationsdurchgänge vorher festzulegen, die Stimuli nur eine vorher festgelegte fixe Zeit darzubieten ("fixed-trial procedure") oder den Stimulus solange zu präsentieren, bis eine bestimmte kumulierte Fixationsdauer durch Summierung der einzelnen Blickfixationsdauern

erreicht ist. Diese fixe Habituation wird gelegentlich als Familiarisierungsmethode bezeichnet, wobei sich wiederum zwei Verfahren unterscheiden lassen: Im Falle der Technik der fixen Präsentationsdauer wird ein festes Zeitintervall definiert, innerhalb dessen der Stimulus präsentiert wird. Gemessen wird die Dauer der Fixation des Stimulus in diesem Intervall, wobei häufig die Dauer einzelner Blicke summiert wird. Dieses Verfahren ist nicht unproblematisch, da es davon ausgeht, dass es zwischen stetig-längeren und unterbrochenen-kürzeren Fixationen keinen Unterschied gibt. Bei der Technik der fixen Blickdauer währt die Stimulusdarbietung so lange, bis die Fixationszeit ein vorher festgesetztes Limit erreicht hat, so dass die Habituationsphase sogar aus nur einem Durchgang bestehen kann. Auch in diesem Falle kann es durchaus problematisch sein, Gesamtblickdauern als gleichartig zu interpretieren, ohne die Dauer und Anzahl der einzelnen Blicke zu berücksichtigen.

In der meist unmittelbar anschließenden Testphase wird ein neuer Stimulus abwechselnd mit dem alten präsentiert. Steigt die Dauer der Blickzuwendung für den neuen Stimulus im Vergleich zu dem Habituationsstimulus an, so liegt eine Dishabituation vor, die die Diskrimination des neuen vom alten Stimulus und das Erinnern an den Habituationsstimulus indiziert. Besonders in Gedächtnisexperimenten wird häufig die präexperimentelle Attraktivität der Habituations- und Teststimuli geprüft, wenn Vermutungen über mögliche Attraktivitätsdifferenzen vorliegen. Als abhängige Variable wurde nicht nur die Fixationsdauer verwendet, sondern auch Augenbewegungen oder physiologische Indikatoren wie die Herzrate (vgl. Bornstein, 1985). Untersuchungen mit auditiven Stimuli wie Phonemen nutzen die Saugfrequenz oder die Kopfdrehungen zur Schallquelle (vgl. Jusczyk, 1985; Krist, Natour, Jäger & Knopf, 1998). Auch der Habituationsverlauf kann als Maß verwendet werden und wird als Indikator für die Enkodierungsgeschwindigkeit interpretiert (z.B. McCall, 1979). Dieser Indikator der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit (z.B. Colombo & Mitchell, 1990) wurde als Prädiktor des IQ im späteren Kindesalter verwendet (Fagan, 1988; McCall & Carriger, 1993).

4. 2. 3. 3 Lernmethoden

Unter dieser Überschrift soll vor allem auf einige Techniken aus dem Bereich des klassischen und operanten Konditionierens eingegangen werden. Weitere, gut erprobte Methoden aus dem Bereich Lernen und Gedächtnis sind z.B. die Methode der visuellen Erwartung (Haith, Hazan & Goodman, 1988), Suchaufgaben wie die A-nicht-B-Aufgabe (Diamond, 1985), die auf eine Aufgabe Piagets (1975a,b) zur Prüfung der Objektpermanenz zurückgeht, oder die Methode der verzögerten Nachahmung (z.B. Meltzoff 1988), die ebenfalls auf Piaget zurückgeht (Piaget, 1975a,c).

Säuglinge verfügen offenbar schon von Geburt an über die Fähigkeit zum Signallernen, d.h. sie können einen konditionierten Stimulus (KS) als Ankündigungssignal für einen zu erwartenden unkonditionierten Stimulus (UKS) interpretieren. Untersuchungen im Rahmen des Klassischen Konditionierens konzentrieren sich auf Verhaltensweisen der Nahrungsaufnahme wie Saugen und Schlucken oder auf Schutzreflexe wie den Lidschlagreflex (vgl. Olson & Sherman, 1983; Rovee-Collier, 1987). Beispielsweise lernten schon 2 bis 48 Stunden alte Neugeborene einen Zusammenhang zwischen einem taktilen Stimulus (Streicheln über die Stirn) und dem Verabreichen einer Zuckerlösung mit Pipette. Folgte der UKS unmittelbar auf den KS, so begannen mehr Säuglinge schon während des

KS zu saugen als in einer Kontrollbedingung, die ein längeres Intervall zwischen KS und UKS realisierte (Blass, Ganchrow & Steiner, 1984).

Auch der Lidschlagreflex ließ sich schon bei 20 Tagen alten Säuglinge konditionieren. Ein Ton wurde als KS und ein Luftstoß als UKS verwendet; zehn Tage später zeigte sich in einer zweiten Trainingsphase ein bedeutsamer Ersparnisereffekt. Das optimale Intervall zwischen KS und UKS war mit 1 500 msec deutlich länger als bei Erwachsenen mit 0.5 sec (Little, Lipsitt & Rovee-Collier, 1984). Bei der Frage, ob Neugeborene zwischen 3 und 10 Tagen klassisch konditionierbar sind, kommt Sameroff (1971) anhand der Literatur allerdings zu dem Schluss, dass dies nicht eindeutig nachweisbar wäre. Neuartige Stimuli, die nicht in ein angeborenes Reflexschema passten, würden primär Defensivreaktionen auslösen. Sameroff weist darauf hin, dass erst ab einer gewissen Differenziertheit der perzeptiven und motorischen Systeme eine über angeborene Schemata hinaus gehende Koordination möglich wird. Diese erweiterten Koordinationen ermöglichen Assoziationen zwischen KS und UKS, die einem weiteren Stimulusbereich entstammen.

Im Bereich des operanten Konditionierens werden wie bei den Präferenz- und Habituationmethoden diejenigen Effektorsysteme von Säuglingen genutzt, über die sie Kontrolle haben, z.B. Kopfdrehbewegungen oder Saugen (Papousek, 1961; Caron, 1967; Sameroff, 1967). Carons (1967) Hinweis ist nach wie vor aktuell, dass die differentielle Fixationsmethode auf den Präferenzen der Säuglinge beruht. Die Bedeutung des Stimulus ist folglich nicht eindeutig interpretierbar, da sich nicht mit letzter Sicherheit sagen lässt, ob die erhöhte Aufmerksamkeit eines Säuglings gegenüber einem visuellen Reiz auf dessen strukturellen oder verstärkend-motivationalen Eigenschaften zurückführbar ist. Operante Methoden seien daher vor allem geeignet, die Stimuluseffekte eindeutig interpretieren zu können. Das Rationale der operanten Techniken besteht darin, dass der Zugang zur Stimulation vom Verhalten des Säuglings abhängt. Auf diese Weise können sensorische Stimulationen daraufhin geprüft werden, inwieweit sie als Verstärker zur Kontrolle des Verhaltens des Säuglings geeignet sind. Zahlreiche Studien aus den letzten 40 Jahren belegen, dass sich das Kopfdrehen zur Konditionierung durch visuelle und auditive Stimulation eignet (zusammenfassend Kuhl, 1985). Die Arbeiten Carons (1967) belegten, dass sich das Kopfdrehen durch moderat komplexe Stimuli in beide Drehrichtungen gut operant konditionieren lässt und folglich visuelle Stimuli als differentielle Verstärker effektiv sein können. Die im Mittel 3;5 Monate alten Babys wurden in einem speziellen Versuchsbettchen untersucht. Durch eine Schnur mit Gegenständen wurden sie dazu gebracht, ihren Kopf nach links oder rechts zu drehen. Danach wurde ein visueller Stimulus parallel zur Körperlängsachse des Babys projiziert, so dass die Babys ihren Kopf zurück in die Mittellinie drehen mussten. Anschließend begann die Konditionierung: Nach zwei oder drei Durchgängen konnten die Babys durch eine Rassel dazu gebracht werden, ihren Kopf in der gewünschten Richtung aus der Mittellinie wegzudrehen. Die Sequenz aus "den Kopf aus der Mittellinie nach rechts oder links drehen, in die Mittellinie zurückdrehen, Fixieren des Stimulus, Präsentationsende, Wegdrehen aus der Mittellinie" wurde stabilisiert. Diverse Extinktions- (homogener Flächenreiz), Rekonditionierungs- und Transferphasen auf die kontralaterale Seite schlossen sich an. Das Ergebnis zeigte eindeutig, dass das Kopfdrehen der Babys durch komplexere visuelle Stimuli kontrolliert werden konnte. Folglich haben bestimmte visuelle Stimuli einen verstärkenden Wert für die Genese und Aufrechterhaltung des Blickverhaltens von Säuglingen.

Sowohl die Kopfdrehmethode (“head turn technique”, HT) als auch die als die Saugmethode (“high-amplitude sucking technique”, HAS) spielten vor allem im Bereich der akustischen Stimulation, der klinischen Audiologie, der Wahrnehmung von Melodien und Rhythmen sowie bei der Erforschung der Diskrimination von Sprechsignalen eine große Rolle und gelten als etablierte Verfahren (z.B. Trehub, Schneider, & Bull, 1981; Kuhl, 1985; Jusczyk, 1985; Schneider & Trehub, 1985; Morrongiello, 1988; Werner & Bargones, 1992; Benasich & Tallal, 1996). Die HAS-Methode wird vor allem bei Neugeborenen (z.B. Bijeljac-Babic, Bertoncini, & Mehler, 1993) bevorzugt angewandt, die HT hingegen bei Säuglingen zwischen 5 bis 12 Monaten. Bekannt sind vor allem die Studien, die Kuhl (1983, 1987) zur Frage der Äquivalenzklassenbildung von Phonemen durchführte. Vokale werden als gleich beurteilt, auch wenn sie unterschiedliche Sprecher unterschiedlichen Geschlechts unterschiedlich aussprechen. Kuhl konnte unter Verwendung der HT zeigen, dass schon 6 Monate alte Säuglinge zur Äquivalenzklassifizierung von Vokalen in der Lage sind. Marean, Werner, & Kuhl (1992), zeigten dies auch für 2 Monate alte Säuglinge. Das Rationale ist, dass Säuglinge, meist auf dem Schoße der Mutter sitzend, ein bestimmtes Phonem, z.B. /a/ mehrfach hören. Zu einem Zeitpunkt wird ein anderes Phonem vorgespielt, z.B. /i/. Wenn diese Veränderung eintritt, wird ein visueller Verstärker, z.B. ein Spielzeugtier, präsentiert, so dass der Säugling zum Verstärker schaut. Diese Prozedur wird wiederholt, bis der Säugling gelernt hat, bei der Veränderung des Phonems den Kopf zum Spielzeugtier zu drehen. Mit Hilfe dieser Prozedur können Veränderungen variiert, Generalisierung oder Diskrimination geprüft werden.

Die HT kann in verschiedener Weise realisiert werden (vgl. Schneider, Trehub, & Thorpe, 1991), entweder mit zwei Schallquellen, rechts und links vom Säugling oder mit einer Schallquelle, rechts oder links vom Baby; es werden aber auch Kopfhörer verwendet. Die Versuchsleiterin und die Pflegeperson tragen immer einen Kopfhörer, mit dem die Signale maskiert werden können. In der Ein-Lautsprecher-Version sitzt dem Baby eine Versuchsassistentin gegenüber, die mit Hilfe von geräuscharmen Spielsachen dafür sorgt, dass das Baby nicht dauerhaft in Richtung der Schallquelle orientiert ist. Ein Durchgang wird dann initiiert, wenn das Baby geradeaus schaut. Das Signal wird für eine bestimmte Dauer präsentiert und die Versuchsleiterin oder eine zweite Versuchsassistentin muss entscheiden, ob das Baby den Kopf in Richtung der Schallquelle bewegt und dann die visuelle Verstärkung präsentieren. Zur Kontrolle sind in die Signal-Durchgänge Non-Signal-Durchgänge eingestreut, so dass sich die Rate des falschen Alarms ermitteln lässt.

In der Zwei-Lautsprecherversion sitzt die Versuchsleiterin ebenfalls dem Baby gegenüber. Allerdings wird in jedem Durchgang in zufälliger Weise abwechselnd rechts und links ein Signal solange präsentiert, bis der Säugling seinen Kopf um 45° in die relevante Richtung bewegt. Die signalwärts gerichtete Kopfdrehung wird wiederum visuell verstärkt.

Trotz vieler Ähnlichkeiten gibt es einige Aspekte, durch die sich beide Verfahren wesentlich unterscheiden. In der Ein-Lautsprecher-Version indiziert das Baby die Anwesenheit eines Signales durch eine Kopfdrehung und dessen Abwesenheit durch eine Unterlassung einer Kopfdrehung. Es handelt sich um eine “single-interval, go/no go detection task” (G/NG-D). In dieser Anordnung muss das Signal entdeckt werden, wohingegen die Zwei-Lautsprecher-Version eine Lokalisation involviert, da das Signal in jedem Durchgang präsentiert wird. Es handelt sich um eine “single-interval, two-alternative, forced-choice localization task” (2AFC-L). In der G/NG-D-Aufgabe muss die Signaldauer pro Durchgang fix sein, im Gegensatz dazu steht die 2AFC-L Aufgabe, in der die Signaldauer so lange

dauert, bis der Säugling seinen Kopf dreht. Wird die auditive Sensitivität bei Säuglingen untersucht, dann, so Schneider et al. (1991), können die Unterschiede zwischen Detektions- und Lokalisationsaufgaben kritisch werden. Vom Standpunkt der Signalentdeckungstheorie aus (SET) werden die Nonsignal-Durchgänge als "Rauschen" (N), die Signaldurchgänge als "Signal+Rauschen" (S+N) und die Differenz der Mittelwerte der Verteilungen der N und S+N-Durchgänge als d' anzusprechen sein. In der G/NG-D Aufgabe kann es für die Säuglinge sinnvoll sein, bei N-Durchgängen den Kopf Richtung Schallquelle zu drehen und damit möglichst viele "falsche Alarmer" zu produzieren, da dies nicht mit Kosten verbunden ist. Hinzu kommt, dass es mehr S+N- als N-Durchgänge gibt. Als Lösungsmöglichkeit wurde vorgeschlagen, dass die Versuchleiterin beim Verstärken als "entertainer" fungiert, um die Rate des falschen Alarms zu kontrollieren. Hinzu kommt, dass bei der G/NG-D Aufgabe mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,5$ zu erwarten ist, im jeweils nächsten Durchgang ein Signal und damit eine Verstärkung präsentiert zu bekommen. In der 2AFC-L Aufgabe beträgt diese Wahrscheinlichkeit jedoch 1, sodass die Lernbereitschaft in dieser Aufgabe höher sein könnte. Die 2AFC-L- Aufgabe scheint also besser als die G/NG-D-Aufgabe zu sein, vorausgesetzt, die Lokalisation fällt den Säuglingen nicht schwerer als die Detektion.

Abschließend sei noch eine weitere operante Lerntechnik erwähnt, die große Aufmerksamkeit in der Säuglingsforschung gefunden hat und findet. Allerdings wird sie nur von einer Forschungsgruppe weltweit realisiert. Es handelt sich um die Methode der konjugierten Verstärkung, die von der Forschungsgruppe um Rovee-Collier entwickelt wurde (z.B. Rovee-Collier, 1990) und die auf einer speziellen Adaptation von Rovee & Rovee (1969) beruht. Die Verstärkung des Säuglings erfolgt kontinuierlich und in der Intensität direkt proportional zur Eigenaktivität des Säuglings, so dass sowohl die Dauer als auch die Rate des Reagierens höher als in sonstigen operanten Lernparadigmen ist. Der Säugling liegt in einem Bettchen, über dem ein Mobile gut sichtbar für den Säugling hängt. Durch ein Band ist das Mobile mit einem Bein des Säuglings verbunden, so dass seine Strampelbewegungen das Mobile bewegen, womit diese Bewegungen verstärkende Wirkung haben. Mit dieser Technik konnten beispielsweise visuelle Pop-out-Phänomene bei Säuglingen im Zusammenhang mit dem Texton-Modell der Objekterkennung nachgewiesen werden (Rovee-Collier, Hankins, & Bhatt, 1992).

4. 2. 4 Interne und externe Validität von Säuglingsexperimenten

Der Ausgangspunkt der Erörterung methodologischer und methodischer Aspekte der Säuglingsforschung war die Frage, inwieweit der psychologischen Säuglingsforschung eine Theorie der kognitiven Kompetenzen des humanen Säuglings sowie der Mechanismen zugrunde liegt, die diese entwicklungsmäßig verändern. Hier gilt nach wie vor die Aussage von Haith (1993), dass die Säuglingsforschung auf deskriptive Weise "partial accomplishments" feststellt, ohne dass diese Theorien über Teilkompetenzen zu einer geschlossenen Theorie der Kompetenz vereinigt wären (vgl. auch Krist et al., 1998). Insofern kann auch die Frage nach der externen Validität vieler Experimente der Säuglingsforschung nicht befriedigend beantwortet werden, da diese Experimente oftmals keine explizit formulierten Kompetenztheorien repräsentieren. Auch die Validität einzelner Konstrukte wie Aufmerksamkeit, Kausalität, Zeitwahrnehmung, Enumeration oder Objektwahrnehmung ist noch unbefriedigend bestätigt, da es nach wie vor wenige Studien zur Konsistenz unterschiedlicher Situationen und zur Stabilität über ähnliche Situationen und die Zeit hinweg gibt (vgl. Haith & Benson,

1998). Canfield, Smith, Brezsnayak, & Snow (1997) zeigten, wie wichtig Längsschnittstudien im Säuglingsalter zu einzelnen Konstrukten sind, da nur der Vergleich von individuellen und Gruppenentwicklungskurven die Feststellung erlaubt, in welchem Ausmaß interindividuell unterschiedliche Entwicklungspfade auftreten können, welche Veränderungen alterskorreliert sind und in welchem Verhältnis allgemeine und spezifische Veränderungsfaktoren stehen. Solche prospektiv orientierten Studien gestatten auch die Vorhersage von Veränderungen und Stabilitäten, wobei diese durch die Kombination unterschiedlicher Maße kognitiver Funktionen verbessert werden kann (vgl. Colombo, 1993). Das Zusammenwirken der unterschiedlichen psychischen Prozesse im Säuglingsalter zu untersuchen ist daher ein besonderes Desiderat (Aspekt der differentiellen Validität). Eine weitere Frage ist die nach der Generalisierbarkeit auf unterschiedliche Säuglingspopulationen, da an den meisten Untersuchungen normal entwickelte Säuglinge mit Eltern aus dem gehobenen Mittelstand teilnahmen (Problem der Stichprobenrepräsentativität). Hinzu kommen die relativ hohen Ausfallquoten, die allerdings je nach Methode unterschiedlich sind, und die vermutlich nicht zufällig zustande kommen (Wachs & Smitherman, 1985).

Bei der Abschätzung der externen sowie der Konstruktvalidität müssen altersangemessene Untersuchungsbedingungen und Methoden bedacht werden. Besonders deutlich wird dies bei der Diskussion um die Entwicklung der Objektpermanenz. Nach Piaget (1975a) ist die Objektpermanenz die erste komplexere kognitive Invariante, über die der Säugling verfügt. Das Vorliegen der einfachen Objektpermanenz lässt sich nach Piaget ab einem Alter von 8 bis 10 Monaten daran feststellen, dass die Kinder zielsicher ein Tuch entfernen, unter dem ein zuvor gezeigtes Objekt versteckt worden war, wohingegen jüngere Kinder das Interesse an diesem verdeckten Objekt verlieren. Der Indikator der Objektpermanenz ist eine komplexe Greifbewegung, die seitens des Kleinkindes voraussetzt, dass es Greifbewegungen nicht nur koordinieren, sondern auch als Mittel zu einem bestimmten Zweck einsetzen kann. Entsprechend interpretiert Piaget die Objektgenese als Resultante des handelnden Konstruierens, das über die Handlungseffektantizipation vermittelt wird. Seinem konstruktivistisch-genetischen Verständnis des menschlichen Erkennens zufolge sind Begriffe keine Abbilder, sondern im Greifen verwurzelte Ein- und Zu-Griffe auf die Dinge des kindlichen Lebensraumes. Die Kritik an Piaget setzt daran an, dass Piaget das Suchen nach einem Objekt mit dem zielgerichteten Greifen gleichsetzte. Daraus, dass Kinder unter 8 Monaten nicht greifend nach dem Objekt suchen, folgt nicht, dass diese Kinder nicht über Objektpermanenz verfügten. Es könnte ja sein, so Spelke, Breinlinger, Macomber und Jacobson (1992), dass die Bewegungsmotorik noch nicht genügend entwickelt sei. Sie stellen die Forderung auf: "In general, studies of early cognitive development require methods that focus on actions within the repertoire of infants of all of the ages under study. Ideally, these studies should focus on action patterns that do not change over the infancy period. Visual preference-for-novelty methods may meet this requirement" (S.608). An diesen Kriterien muss die Konstruktvalidität diskutiert werden: Sind die unterschiedlichen Blickdauern Indikatoren bestimmter Erwartungen über das Erscheinen und Verschwinden von Objekten, die wiederum den Schluss auf einfache Objektpermanenz erlauben? Sind die Blickdauerindikatoren der jüngeren Säuglinge (ca. 4 Monate) genauso valide Objektpermanenzindikatoren wie die Greifbewegungen der ca. 9 Monate alten Kinder? Werden Objekte von Säuglingen mit noch unvollständigen Greif- und Bewegungsmöglichkeiten genauso interpretiert wie von Säuglingen oder Kleinkindern, die über entwickeltere Greiffähigkeiten verfügen?

Schließlich sei mit Haith (1998) darauf hingewiesen, dass bei der Vorstellung vom kompetenten Säugling eine ausgeprägte Tendenz besteht, die mentalen Prozesse des Säuglings zu sehr nach dem Vorbild der Erwachsenen zu interpretieren. Und das, obwohl Säuglinge nicht sprechen und die Kenntnisse über diese mentalen Prozesse meist sprachvermittelt sind. Haith zieht nach der Diskussion der Säuglingsforschung der letzten 15 Jahre den Schluss, dass viele Interpretationen der Befunde die mentalen Fähigkeiten der Säuglinge sehr überschätzen. Gerade in dieser Hinsicht wirkt sich auch das sogenannte "file drawer problem" besonders deutlich aus, das keine Metaanalysen aller Befunde erlaubt (Rosenthal, 1979, 1991). Zusammen mit dem Repräsentativitätsproblem und dem Umstand, dass weltweit relativ wenige Forschungsgruppen im Bereich der kognitiven Säuglingsforschung tätig sind, kann vermutet werden, dass in der Säuglingsforschung vor allem kognitive Kompetenzen von Säuglingen untersucht werden, die eher an den Extremen der Populationsverteilung dieser liegen.

Eng damit zusammen hängen die interne Validität, die Äquivalenz und Vergleichbarkeit der Untersuchungsbedingungen sowie die Reliabilität (Verhältnis der erklärten zur gesamten Varianz), die die Replizierbarkeit der Studien bedingen. Viele Beobachtungen und Befunde sprechen dafür, dass die Verhaltensvariabilität bei Säuglingen erheblich größer ist als bei Erwachsenen. Säuglinge können ihre Befindlichkeitsfluktuationen kaum kontrollieren und weisen deutliche intra- und interindividuelle Reaktivitätsunterschiede auf (vgl. Ruff & Rothbart, 1996), die von den Pflegepersonen reguliert werden. Bei der Aufklärung des Orientierungs- und Präferenzverhaltens von Säuglingen muss die habituelle Reaktivität einbezogen werden, da Präferenzverhalten und Interesse stark mit dem Temperament interagieren. Diese Interaktion scheint auch wesentlich für die drop-out-Quoten verantwortlich zu sein, so dass die meisten Befunde der Säuglingsforschung von ausgeglichenen Kindern stammen dürften. Folglich ist auch von kleinen Effektstärken auszugehen und viele Effekte werden sich nur dann abbilden lassen, wenn unterschiedliche Methoden, Techniken und Indikatoren im Sinne einer multitrait-multimethod-Strategie kombiniert werden. Ein weiteres Problem ist, dass viele Methoden nur für umschriebene Altersgruppen eine befriedigende Reliabilität aufweisen. Vermutlich gibt es kaum Verfahren, die über einen größeren Altersbereich hinweg eine vergleichbare Reliabilität haben. Wiederum stellt sich die Frage nach der altersbezogenen Angemessenheit der Stimulusvariablen, da sich Motive, Motivationslagen und Präferenzen mit dem Alter ändern (z.B. Bevorzugung eines manipulativen Explorationsmodus im Krabbelalter). Versuchstechniken, die die visuelle Präferenzmethode in der einen oder anderen Form realisieren, sind ab dem 8. Monat nur noch sehr selten reliabel verwendbar, da die motorische Aktivität deutlich ansteigt, weswegen stattdessen die Methoden präferentiellen Greifens und Explorierens verwendet werden. Durch die Probleme über mehrere Altersbereiche hinweg vergleichbare Aufgabenschwierigkeiten und Komplexitätsabstufungen herstellen zu können, muss die Annahme einer unveränderten Konstruktvalidität stark bezweifelt werden.

Zumindest sollten diese methodologischen und methodischen Probleme Anlass sein, die Befunde aus der Säuglingsforschung zurückhaltend zu interpretieren. Sie sollten auch bei der Frage berücksichtigt werden, von welchen Startkompetenzen der Säuglinge und von welchen Mechanismen der Kompetenzentwicklung ausgegangen werden soll.

4. 3 Befunde zur numerischen Kompetenz von Säuglingen

In den letzten 20 Jahren wurden einige Studien durchgeführt, die sich mit den Vorläuferkompetenzen des Quantifizierens und Erfassens von Numerositäten im Säuglingsalter befassten. Diese Studien befassten sich nicht mit Größenverhältnissen oder zahlenmäßig großen Objektmengen, sondern mit kleinen Mengen diskreter Elemente. Die häufige Verwendung kleiner Numerositäten stützte die Vermutung, dass Numerositäten exakt repräsentiert werden. Es wird angenommen, dass eine Größe nicht nur approximativ, sondern sowohl die Gruppe als auch die diese konstituierenden Elemente exakt repräsentiert werden. Dies ist eine Voraussetzung dafür, dass beim Vergleich zweier Numerositäten das Eins-zu-eins-Korrespondenz- und das Abstraktionsprinzip angewendet werden können. Die Unterscheidung zweier Numerositäten würde in einer sukzessiven Paarbildung von Elementen bestehen und, falls diese vollständig gelingt, würde die Gleichheit, im anderen Falle die Unterschiedlichkeit der Numerositäten festgestellt werden. Gelman und Gallistel (1978) nehmen an, dass die Kompetenz, die dem Diskriminieren zweier Numerositäten zugrunde liegt, in Zählprinzipien wurzelt. Sie nehmen dazu explizit die Position der "principles first" ein, was besagt, dass diese Prinzipien angeboren sind. Die Repräsentationen und Mechanismen, die diesen Prinzipien zugrunde liegen sollen, wurden allerdings nicht näher erläutert. In späteren Publikationen (z.B. Gallistel & Gelman, 1992) wurde das Akkumulatorzählmodell vorgeschlagen, das mit diesen Prinzipien in Einklang steht, ohne dass im Detail geklärt wird, ob dieses Modell nun die Realisierung der Prinzipien sei oder nicht.

Empirisch belegt ist, dass schon Säuglinge Numerositäten diskriminieren können. Starkey und Cooper (1980) untersuchten die Diskrimination der Numerositäten 2 versus 3 und 4 versus 6 bei durchschnittlich 4 Monate alten Säuglingen. Ihre Studie war von der Überzeugung getragen, "that the ability to represent the numerical value of a set of items may be necessary for the development of an understanding of number". Es sollten Belege erbracht werden, "that 22-week-old infants can also discriminate exact numbers of items. This raises the possibility that the young child's verbal counting abilities grow in part from the infant's numerical ability". Gleichzeitig weisen sie zum einen auf Subitizing als "rapid perceptual process" hin, den zweijährige Kinder zur Unterscheidung kleiner Numerositäten (bis 4) nutzen sollen. Zum anderen verwiesen sie auf Studien, die zeigen, dass Säuglinge Stimulismengen unterscheiden, deren Numerosität sich deutlich unterscheidet (z.B. 2 versus 8 und 32 versus 128). Dieser Mengendiskrimination soll derselbe Mengenschätz-mechanismus wie bei Erwachsenen zugrunde liegen, eine approximative Repräsentation der Numerosität, wohingegen das spätere Zahlenverständnis von der Wahrnehmung und exakten Repräsentation kleiner Anzahlen ausgehen soll.

Starkey & Cooper (1980) realisierten ein visuskontrolliertes Habituations-Dishabituations-Paradigma mit der abhängigen Variable "Dauer der ersten Fixation". Als Stimuli wurden linear angeordnete Punkte der Numerositäten 2, 3, 4 und 6 verwendet, die hinsichtlich Länge und Abstand kontrolliert wurden. Jede Numerosität diente sowohl als Habituations- als auch als Dishabituationsstimulus, um Komplexitätspräferenzen auszuschließen. Als Ergebnis fanden die Autoren, dass die Babys unabhängig von Präsentationsabfolge, Länge, Position und Abstand 2 von 3 Punkten unterschieden, aber nicht 4 von 6. Die Autoren interpretieren ihren Befund als Evidenz für Subitizing in der 2 vs 3-Bedingung, wobei sie darauf hinweisen, dass die Art des zugrundeliegenden

Prozesses unbekannt ist. Im Falle eines iterativen Prozesses würde es sich ihrer Ansicht nach um eine primitive Vorform des Zählens handeln. Auch könnte sich die Art des Subitizing-Prozesses in der Entwicklung ändern, z.B. könnten Säuglinge ein Paar Objekte als "ein Ding und ein Ding" auffassen, etwas ältere Kinder hingegen als "zwei Dinge".

Antell & Keating (1983) untersuchten Neugeborene mit einem mittleren Alter von 53 Stunden, indem sie den Versuch von Starkey und Cooper (1980) adaptierten. Die linearen Punktemuster wurden zwar ebenfalls hinsichtlich Länge und Dichte kontrolliert, allerdings werden die Abstände der schwarzen Punkte mit 0.8cm Radius nicht mitgeteilt. Mit einem Abstand von 17 - 19 cm zwischen der Punktekarte und den Augen wird der deutlich geringeren Sehschärfe der Neugeborenen Rechnung getragen. Der Sehwinkel, unter dem ein Punkt (ca. 2.5°), das kürzeste Muster (7.8°) und das längste Muster (29.6°) gesehen wurden, ist aber erheblich größer als in anderen vergleichbaren Studien. Stellt man schließlich noch die eingeschränkte Bewegungsfähigkeit der Augen von Neugeborenen in Rechnung, so kann vermutet werden, dass zumindest die längeren Punktemuster erheblich schwerer wahrzunehmen waren als in Studien mit vergleichbarem Stimulusmaterial (vgl. Starkey & Cooper, 1980). Doch Antell und Keating berichten in den vier Bedingungen (H = Habitationsstimulus, T = Teststimulus; 2H->3T, 3H->2T, 4H->6T, 6H->4T)) fast gleiche mittlere Blickdauern der ersten beiden Habitationsdurchgänge. Insofern bildet sich die Komplexität auf der Variable "Blickdauer" nicht ab, was mit der Studie von Starkey & Cooper vergleichbar ist. Die Neugeborenen unterschieden 2 von 3 Punkten, aber nicht 4 von 6 Punkten. Das Habitationskriterium wich jedoch etwas von Starkey und Coopers Studie ab. In zwei aufeinander folgenden Durchgängen musste die Blickdauer im Vergleich zum Mittelwert der Fixationsdauer aus den ersten beiden Durchgängen um mindestens 8 Sekunden zurückgehen. Außerdem wurde der Teststimulus nur zweimal präsentiert. Im Gegensatz zu Starkey und Cooper, die keine Angaben über die Geschlechterverteilung und mögliche Geschlechtseffekte machten, fanden Antell und Keating einen solchen: Sie berichten, dass männliche Neugeborene in der Testphase länger fixierten als die weiblichen Neugeborenen, wohingegen in der Habitationsphase kein vergleichbarer Effekt auftrat. Antell und Keating interpretieren ihren Befund so, dass Säuglinge numerische Invarianten abstrahieren, wobei sich die Numerosität prinzipiell nicht von anderen Invarianten wie Farbe oder Form unterscheidet. Diese Abstraktion invarianter Stimuluseigenschaften sehen sie als die Ursache des Neuigkeitseffektes, was sich in der Sensitivierung für die Änderung der Stimuli unabhängig von redundanten Eigenschaften wie Größe oder Position zeigt. Dies impliziert keineswegs, dass die Säuglinge die Eigenschaften, welche den Invarianten zugrunde liegen auch verstanden oder konzeptuell integrierten.

Strauss & Curtis (1981) führten ebenfalls eine Studie zur Diskrimination von Numerositäten durch. Sie gingen von der Überlegung aus, dass die Ontogenese der Abstraktion von Numerositäten Aufschluss darüber geben könnte, ob es sich bei dieser Abstraktionsleistung um einen eher perceptiven (z.B. Klahr & Wallace, 1976) oder um einen eher kognitiven Prozess (z.B. Gelman & Gallistel, 1978) handelt. Zuvor müsse jedoch gezeigt werden, dass Säuglinge in der Lage sind, visuelle Anordnungen zu diskriminieren, deren einzige Gemeinsamkeit ihre Numerosität ist. Des Weiteren müsse geprüft werden, welche weiteren perceptiven Faktoren wie beispielsweise die Homogenität der Stimuli die Wahrnehmung von Numerositäten beeinflussen. Es wurde eine visuskontrollierte Habitierungs-Dishabitierungs-Methode realisiert. Babys zwischen 10 und 12 Monaten wurden auf eine Numerosität n habituiert, wobei als Habitierungskriterium das Erreichen oder Unterschreiten von

50% der mittleren Blickdauer der ersten drei Habituationsdurchgänge verwendet wurde. Der Vergleichswert wurde jeweils aus dem Mittel der Blickdauer von drei aufeinanderfolgenden Durchgängen errechnet. In der Testphase wurden den Babys vier Numerositäten präsentiert, eine ausbalancierte, alternierende Folge aus der vertrauten Numerosität n und neuen Numerositäten, entweder der Numerosität $n+1$ oder $n-1$. Die Diskriminationsbedingungen 2vs3, 3vs4 und 4vs5 wurden in separaten Gruppen untersucht, wobei die Hälfte der Kinder in jeder Gruppe auf die Numerosität n , die andere Hälfte auf die Numerosität $n+1$ habituiert wurde. Zusätzlich bekam eine Hälfte der Kinder heterogene, die andere homogene Objekte präsentiert. Die heterogenen Objekte waren farbige Zeichnungen, wie sie in Bilderbüchern zu finden sind, z.B. Hühner, Puppen, Flaggen oder Hunde. Objektart, -größe und -position variierten von Durchgang zu Durchgang. Die homogenen Objekte bestanden aus Bildern von Hühnern, deren Größe und Position im Gegensatz zu Objektart und Anzahl variierte. Die Objekte wurden quasi-zufällig in einer virtuellen 4x4 Matrix angeordnet. Die diaprojizierten Numerositäten umfassten einen Sehwinkel zwischen 2° und 7° . Dichte, Helligkeit, Fläche und Konturen wurden ebenfalls kontrolliert. Allerdings wurde in der Habituationsphase immer ein Satz von 5 unterschiedlichen Dias in der selben Reihenfolge gezeigt, um die Wahrscheinlichkeit des Erreichens des Habituationkriteriums zu erhöhen. In der Testphase wurden hingegen Dias der habituierten Numerosität gezeigt, die das Baby noch nicht gesehen hatte. Die Autoren berichten eine signifikante vierfach Interaktion aus Geschlecht, Bedingung, Numerosität und Durchgangszahl, die Abfolge hatte in der Testphase keinen Einfluss. In der 2vs3 Bedingung wurde 2 von 3 unterschieden, und es gab keine Effekte des Geschlechtes oder der Homogenität. In der Bedingung 3vs4 diskriminierten nur die weiblichen Babys 3 von 4 homogenen Items, wohingegen die männlichen Babys 3 von 4 heterogenen Items unterschieden. In der 4 vs 5 Bedingung waren keine Diskriminationsleistungen festzustellen. Die Autoren können sich die spezifische Interaktion zwischen Geschlecht, Homogenität und Bedingung nicht erklären, aber sie spekulieren, dass die Diskrimination 3vs4 möglicherweise schwieriger war als die 2vs3 und folglich höhere Anforderungen an die Aufmerksamkeit stellte. Außerdem sei nicht auszuschließen, dass die Homogenität der Objekte die Diskriminationsleistungen beeinflusse. Festzustellen war jedoch, dass die Babys 2 von 3 sicher unterscheiden können, aber nicht 4 von 5 Objekten. Allerdings ist damit noch nicht geklärt, ob es sich um eine perzeptive Fertigkeit oder um eine Art "cognitive awareness of number" handelt. Die Autoren sind entsprechend zurückhaltend bei der Frage, ob die Säuglinge die Numerosität im Sinne des Eins-zu-Eins-Prinzips und des Abstraktionsprinzips repräsentieren. Das Phänomen der Diskrimination kleiner Anzahlen müsste, um die Annahme eines abstrakteren Repräsentationsmechanismus zu stützen, sich auch in einer anderen Modalität finden lassen. Schließlich wäre intramodal zu zeigen, dass die Diskrimination von Numerositäten unbeeinträchtigt von der Variation perzeptueller Eigenschaften wie Muster, Kontrast oder Fläche möglich ist. Im entgegengesetzten Falle würde dies wiederum eher für ein "perceptual skill" sprechen.

Im Gegensatz zu Strauss & Curtis (1981) fanden Treiber & Wilcox (1984), dass die im Mittel 4 Monate alten Säuglinge 4 von 5 Elementen unterschieden. Sie verwendeten zufällig angeordnete Punktemuster, wobei Fläche, Konturedichte und Gesamtkontur kontrolliert wurden. Das gesamte Muster wurde unter einem Sehwinkel von 10° gesehen, die Punktedurchmesser betrugen $0,6^\circ$, $1,2^\circ$, $1,9^\circ$ und $2,5^\circ$. Allerdings verwendeten die Autoren keine säuglingskontrollierte Habitationsprozedur, d.h. die Säuglinge steuerten die Darbietungszeit der einzelnen Stimuli nicht selbst durch ihr

Blickverhalten. Vielmehr präsentierten Treiber und Wilcox die Stimuli für jeweils 10sec und erst beim achten Durchgang der Habituationsphase wurde geprüft, ob die Säuglinge 50% des Mittelwertes der ersten beiden Durchgänge unterschritten oder mindestens erreichten. Da die Säuglinge entweder auf 5 oder 4 Punkte habituiert worden waren, wurden ihnen bei Erreichen des Habitationskriteriums für 10sec einmal der entsprechende Teststimulus, entweder 4 oder 5 Punkte, präsentiert. Säuglinge einer dritten Gruppe, der Kontrollgruppe, waren auf 4 Punkte habituiert worden und bekamen als Test 4 Punkte präsentiert. Als Maß wurde die Differenz zwischen der mittleren Blickdauer der beiden letzten, 10sec dauernden Habitationsdurchgänge und der Blickdauer während des gleichlangen Testdurchganges verwendet. Die Autoren berichten eine bedeutsame Zunahme der Blickdauer in den beiden Experimentalbedingungen, wohingegen in der Kontrollgruppe kein Unterschied festzustellen war. Des weiteren berichten die Autoren, dass außer der Numerosität keine weiteren systematischen Effekte anderer Stimulusmerkmale wie der Konfiguration, der Dichte der Punkte und der Konturlänge aller Punkte registriert werden konnten. Da diese Studie als vermutlich einzige fand, dass Säuglinge auch 4 von 5 Punkten diskriminieren können, sind die Hinweise von Treiber und Wilcox auf die methodischen Unterschiede zur Studie von Strauss und Curtis sowie Starkey und Cooper besonders beachtenswert: In einer Habitations- und Testprozedur, die auf fixen Darbietungszeiten der Stimuli basiert, werden möglicherweise ganz unterschiedliche Blickfixationsarten pro Durchgang kumuliert. Entsprechend berichten die Autoren, dass in der Testphase eine Tendenz zu mehreren kürzeren Fixationen anstelle einer initialen, längeren Fixation bestand. In einer säuglingskontrollierten Prozedur hätte dies zu deutlich kürzeren Darbietungszeiten und einem entsprechend schwächeren Dishabituationseffekt geführt. Ihr Hinweis auf die Komplexität der Stimuli bei Strauss und Curtis scheint weniger relevant, zumal Starkey und Cooper mit Punktemustern ähnliche Befunde erzielten, wobei letztere allerdings nicht die Numerositäten 4 und 5 kontrastierten.

Die Studie von van Loosbroek und Smitsman (1990) erbrachte weitere Evidenzen dafür, dass die Säuglinge die Numerosität als Invariante wahrnehmen. Sie verwendeten sich kontinuierlich bewegende Objekte der Numerositäten 2 bis 4 und untersuchten längsschnittlich Säuglinge im Alter zwischen 5 Monaten und 13 Monaten. Die Untersuchung wurde mit 55 Säuglingen begonnen, die im Altersbereich von 5, 8 und 13 Monaten in je drei Sitzungen mit Numerosität 2, 3 und 4 getestet wurden. Die Werte von insgesamt 30 Säuglingen konnten über alle drei Messzeitpunkte hinweg ausgewertet werden. Den Säuglingen wurden 2, 3 oder 4 Figuren in insgesamt 37 unterschiedlichen rechteckige Formen (Größe: 3.3 cm x 2.3cm) gezeigt, die sich kontinuierlich auf einem schwarzweißen Monitor in 80 cm Entfernung vom Baby bewegten. Die Graustufen der Rechtecke sowie deren Dichte (Abstand) auf dem Bildschirm sowie die Bewegungsbahnen der Rechtecke wurden variiert, letztere so, dass sie möglichst unabhängig voneinander durchlaufen wurden, also kein konsistentes Zusammenhangsmuster bildeten. Die 11 ausgewählten, nicht-linearen Bewegungsbahnen wurden in konstanter Geschwindigkeit durchlaufen und waren durch jeweils 200 Koordinaten definiert. Die Orientierung der Bahnen änderte sich mit konstanter Periode (alle 12 sec), wobei die durchlaufene Distanz jedes Mal unterschiedlich war. Entlang dieser Bewegungsbahnen verdeckten sich die Rechtecke wechselseitig, wobei die Verdeckungen von 15 Koordinaten bis zu maximal 100 reichten. Obwohl sich die mittlere Anzahl der Verdeckungen über die Numerositäten hinweg nicht unterschied, konnte dies für Dauer und Ausmaß der Verdeckung sehr wohl sein, was nicht systematisch mit der

Numerosität zusammenhing. Die Bewegungen, Verdeckungen, Figuren und Graustufen wurden sowohl in der Habituations- als auch in der Testphase so variiert, dass Muster, Anzahl der Verdeckungen, Fläche und Leuchtdichte sich über alle Durchgänge und Numerositäten hinweg veränderten. Der Versuchsablauf wurde als säuglingskontrollierte Habituation realisiert, wobei als Maß die Blickdauer diente. Jeder Versuchsdurchgang wurde durch einen Ton signalisiert, der Säugling musste mindestens 1sec hin- und 2sec durchgehend wegsehen, damit der nächste Durchgang beginnen konnte, wobei zwischen den Durchgängen der Monitor für 6 sec geschwärzt wurde. Als Habitationskriterium wurden mindesten 50% der mittleren Fixationsdauer aus den ersten drei Durchgängen gewählt. Nachdem dieses Kriterium in drei aufeinanderfolgenden Durchgängen erreicht worden war oder nachdem maximal 23 Habitationsdurchgänge absolviert worden waren, begann die Testphase. Diese bestand aus 4 Durchgängen, in denen zweimal die alte Numerosität (O) und zweimal die neue Numerosität (N) präsentiert wurde. In den N-Durchgängen wurden entweder Numerositäten $\underline{n}-1$ oder $\underline{n}+1$ der Habitationsnumerosität \underline{n} dargeboten. Es gab zwei Testabfolgen, O-O-N-N und N-N-O-O. Zur Bestimmung eines eventuellen Neuigkeitseffektes wurde eine Maßzahl errechnet: Dazu wurden die beiden N-Durchgänge gemittelt und mit den beiden jeweils vorausgehenden Durchgängen verglichen. Für die O-O-N-N-Abfolge waren dies die ersten beiden Testdurchgänge. Im Falle der N-N-O-O-Abfolge wurden die beiden letzten Durchgänge der Habitationsphase herangezogen, um eine eventuelle Verlängerung der Blickdauer in den N-Durchgängen zu prüfen. Für die O-O-N-N-Abfolge wurden ebenfalls die beiden letzten Habitationsdurchgänge herangezogen und mit den O-Durchgängen verglichen, um die spontane Veränderung der Blickdauer beim Übergang von der Habitations- zur Testphase zu bestimmen. Dieses Maß der spontanen Blickänderung wurde zu den letzten beiden Habitationsdurchgängen vor der N-N-O-O-Abfolge addiert. Alle Maße wurden in Prozentwerte transformiert, indem die kombinierten Blickdauern der beiden letzten vertrauten Numerositäten und die kombinierten Blickdauern der beiden neuen Testnumerositäten durch $\frac{2}{3}$ der kombinierten Blickdauern der drei letzten Habitationsdurchgänge dividiert wurden. Die Ergebnisse sind allerdings nicht eindeutig. Nur bei den 8 Monate alten Kindern war eine bedeutsam längere Blickdauer bei neuen Numerositäten festzustellen. Separate Analysen ergaben, dass auch die 13 Monate alten Kinder bei neuen Numerositäten länger blickten, altersentsprechend aber eine deutlich höhere Varianz aufwiesen. Mit zunehmendem Alter benötigten die Kinder mehr Habitationsdurchgänge. Bei den 5 Monate alten Kindern war der Neuigkeitseffekt dann festzustellen, wenn die zunächst nicht berücksichtigten Kinder in die Analyse der Gesamtstichprobe aufgenommen wurden. Durch den selektiven Ausfall waren besonders die Diskriminanda 3vs4 sowie 4vs5 betroffen. In diesem Bereich zeigen auch die Mittelwerte die kleinsten Differenzen. Eine weitere Analyse belegte, dass größere Numerositäten länger angeschaut wurden als kleinere und damit den Effekt der Komplexität.

Diese Studie zeigt, dass der Wahrnehmung von Numerositäten keine Mustererkennung zugrunde liegt, sondern vielmehr die Diskrimination distinkter Einheiten. Die Bewegung der Rechtecke verhindert laut van Loosbroek und Smitsman die Unterscheidung kleiner Numerositäten aufgrund kanonischer Muster wie dies beispielsweise Mandler und Shebo (1982) annehmen. Van Loosbroek und Smitsman stellen fest: "Objects that move independently and constantly but at different rates in a plane cannot represent a projection of a continuous transformation in three-dimensional space. In addition, the occlusion of objects precludes the specification of a continuous two-dimensional

transformation of a triangle for three units because the necessary invariant cross-ratio cannot be identified” (S.921). Außerdem zeigten andere Studien zur Bildung perzeptiver Einheiten, die mit sich wechselseitig verdeckenden Objekten arbeiteten (z.B. Granrud & Yonas, 1984), dass Säuglinge Interpositionssignale zur Bildung visueller Einheiten heranziehen. Der Vergleich dynamischer mit statischen Darbietungen von Numerositäten weist auf stärkere Komplexitätseffekte hin, die mit der Größe der Numerosität positiv kovariieren. Erst ab einem Alter von ca. 8 Monaten kann von einer relativ robusten Diskrimination von Numerositäten ausgegangen werden, zumindest bezogen auf die Methode der Habituation der Blickdauer. Deutlich wurden auch die Grenzen der Methode der Habituation der Blickdauer bei einem Alter von ca. 1 Jahr.

Die Autoren äußern sich zurückhaltend über mögliche Mechanismen der Diskrimination von Numerositäten. Sie gehen von einer rudimentären Zählfertigkeit aus, die auf dem Entdecken von Einheiten basiert. Wie das Zählen beruhe die Wahrnehmung von Numerositäten darauf, dass die Numerosität über die Zeit und die Ortsveränderung aufrechterhalten wird, was eine Art “tagging” (Markieren) der Einheiten impliziere. Die Autoren halten es für fraglich, ob andere Komponenten der Zählfertigkeit zur Erklärung dieser Leistung herangezogen werden können. Sie weisen auf die Eins-zu-Eins-Korrespondenz hin, fragen sich aber, zwischen welchen Relata diese Korrespondenz hergestellt wird und wie das funktioniert. Analog zum verbalen Zählen kann angenommen werden, dass präverbales Zählen einen iterativen Prozess involviert, der sequentiell verläuft und zwischen gezählten und ungezählten Objekten differenziert. Weder die Studien mit statischen noch ihre eigene Studie mit dynamischen Objekten liefert Belege dafür, dass kleine Numerositäten sequentiell wahrgenommen werden und wie das Zählen mit Ziffern abläuft, was ein gewisses Verständnis von Ordnungsrelationen voraussetze. Folglich betrachten es die Autoren als unplausibel, dass der Fähigkeit, aus sich bewegenden Objekten die Numerosität zu abstrahieren, die selben Eigenschaften des verbalen Zählprozesses zugrunde liegen. Dennoch scheint die Diskrimination von Einheiten genauso wichtig für die früheste numerische Kompetenzentwicklung zu sein wie für das Zählen. Loosbroek und Smitsman interpretieren die Wahrnehmung von Numerositäten als einen visuellen Explorationsprozess, der auf eine kleine Menge von Objekten bzw. Elementen beschränkt ist. Angelehnt an die Theorie der direkten Wahrnehmung Gibsons sehen sie in der visuellen Exploration von Quantitäten die Aufnahme der Information über die Konstanz einer Menge, die eine bestimmte Numerosität repräsentiert. Die invariante Information, die über die kontinuierlichen Bewegungen und Bewegungsänderungen der Objekte hinweg geliefert wird, reicht aus, um den optischen Fluß in distinkte Einheiten zu zerlegen und deren Numerosität zu entdecken. Die Wahrnehmung von Numerositäten kann somit als die Extraktion invarianter Informationen, die aus der Individuation von zusammengehörigen Objekten resultiert, verstanden werden. Über die Möglichkeit der Nutzung dieser Informationen verfügen Säuglinge, bevor sich die Zählfertigkeiten im engeren Sinne entwickeln.

Wie schon die Tierforschung liefert auch die Säuglingsforschung Belege dafür, dass neben dem (verbalen) Zählen non-verbale Quantifikationsprozesse existieren. Im Sinne eines Mechanismus der relativen Numerositätsunterscheidung können Numerositäten anscheinend auch ohne zu zählen diskriminiert werden. Der Distanzeffekt, der sich bei Erwachsenen finden lässt, weist ebenfalls auf einen solchen Mechanismus hin: Die Reaktionszeit, die nötig ist um zu urteilen, ob zwei Numerositäten gleich oder verschieden sind, ist umgekehrt proportional zur Differenz der Numerositäten. Je größer die Differenz ist, desto kürzere Reaktionszeiten lassen sich beobachten (Dehaene et al., 1990). Auf die

Diskriminierbarkeit der Numerositäten lässt sich das Weber-Fechner Gesetz anwenden, wobei der Weber-Bruch Erwachsener bei 16% liegt (van Oeffelen & Vos, 1982). Folglich hängt die Diskriminierbarkeit vom Verhältnis der zu diskriminierenden Numerositäten ab. Humane Säuglinge verfügen mit hoher Wahrscheinlichkeit über die Kompetenz der relativen Numerositätsunterscheidung, doch ob sie die Numerositätsdiskriminanda exakt oder approximativ repräsentieren, bleibt offen. Sicher ist, dass der Weber-Bruch von Säuglingen größer als der Erwachsener ist, er liegt zwischen 25% und 33%. Sicher ist weiterhin, dass Säuglinge nicht symbolisch-sprachlich zählen, da sie nicht über sprachliche Symbole verfügen, die sie ein-eindeutig Elementen zuordnen und über deren letztzugeordnetes Symbol sie die Kardinalzahl der Numerosität bestimmen könnten. Die Annahme, sie würden über nonlinguale, mentale Marken verfügen, die wie Zahlzeichen funktionierten (Gelman & Gallistel, 1978), ist unbewiesen. Dagegen spricht vor allem, dass Säuglinge zwar sehr kleine Numerositäten voneinander unterscheiden können, aber auch größere Mengen, deren Elemente sicherlich nicht einzeln abgezählt werden. Die Annahme mentaler Marken gerät in diesem Falle in Schwierigkeiten, da eine Beschränkung auf wenige Zählmarken nur mit Verweisen auf begrenzte Gedächtniskapazitäten oder andere psychische Mechanismen plausibel gemacht werden kann. Diese Konsequenz zogen Gallistel und Gelman (1991, 1992) letztlich selbst, indem sie die "Füllungszustände" des Akkumulatormodells als analoge Repräsentate der Numerons interpretieren. Damit nähern sie sich nonverbalen Numerositätsdiskriminationsmodellen an.

4. 4 Experimente zur numerischen Kompetenz von Säuglingen

4 . 4. 1 Diskrimination visueller Numerositäten

In einem Experiment soll geprüft werden, durch welchen Weber-Bruch sich die Numerositätsdiskrimination der Säuglinge kennzeichnen lässt, und, damit verbunden, ob das Weber-Fechner Gesetz im Bereich kleiner Numerositäten gilt. Wäre dies nicht der Fall, spräche dies für einen eigenständigen Diskriminationsprozess im Bereich kleiner Numerositäten, der sich als precounting subitizing interpretieren ließe. Da Säuglinge nicht verbal zählen können, kann das Kriterium der schnellen Erfassung kleiner Numerositäten liberaler interpretiert werden als bei Erwachsenen. Da ein zufriedenstellendes Maß der Reaktionsgeschwindigkeit bei Säuglingen schwer zu erheben ist, müsste die Darbietungszeit limitiert werden. Zu diesem Zwecke muss aber durch einen zusätzlichen Reiz die Aufmerksamkeit des Säuglings auf den Präsentationsort gelenkt werden, so dass die resultierenden Blickdauern nicht eindeutig interpretiert werden könnten. Der höhere untersuchungstechnische Aufwand kann aber reduziert werden, da die bei Erwachsenen oder älteren Kindern verwendete sehr kurze Präsentationsdauer bei der Untersuchung des Subitizing sicherstellen soll, dass nicht verbal gezählt wird. Daher ist es bei Säuglingen möglich, die Kompetenz zur Diskrimination von Numerositäten über die Habituationstechnik zu prüfen.

Die Fragestellung des Experiments ist folgende: Gilt im Bereich kleinerer Numerositäten das Weber-Fechner Gesetz? Falls nicht, belegt dies die Annahme, dass in diesem Bereich andere Mechanismen der Mengenerfassung- und -diskrimination wirksam sind.

4. 4. 1. 1 Experiment 4

Um die Gültigkeit des Weber-Fechner Gesetzes im Bereich kleiner Numerositäten zu überprüfen, wurden zu diskriminierende Numerositäten mit jeweils dem selben Weber-Bruch hergestellt. Babys können reliabel 2 von 3 Objekten unterscheiden, deren Verhältnis einem Weber-Bruch von 33% entspricht. Wenn das Weber-Fechner Gesetz auch im Bereich kleiner Numerositäten zutrifft, dann sollten die Babys auch 4 von 6 Objekten unterscheiden können. Zwar fanden Starkey und Cooper (1980), dass Säuglinge 2 von 3 Punkten, aber nicht 4 von 6 Punkten unterscheiden können, aber ihr Befund ist nur eingeschränkt verallgemeinerbar, da ausschließlich lineare Punktemuster Verwendung fanden. Die Studie von Treiber und Wilcox (1984) ergab hingegen, dass Säuglinge 4 von 5 zufällig angeordnete Punkten unterscheiden können.

Um eine eventuell eingeschränkte Gültigkeit des Weber-Fechner Gesetzes zu prüfen, erschien es daher nötig, die beiden Diskriminationsbedingungen 2vs3 und 4vs6 Elemente mit Zufallspunktmustern zu untersuchen. Da sich der Befund von Treiber und Wilcox zunächst so interpretieren lässt, dass Säuglinge 4 Punkte identifizieren und dadurch von 5 unterscheiden können, wäre ein vergleichbarer Befund bei der Unterscheidung von 4 vs 6 Punkten zu erwarten. Treiber und Wilcox verwendeten allerdings keine säuglingskontrollierte Habituations-Dishabituationsprozedur, sondern eine vom Versuchsleiter kontrollierte, fixe Darbietungsdauer. Diese macht es nötig, qualitativ und quantitativ sehr unterschiedliche Blicke als Indikator aufmerksamen Betrachtens der Reize zu addieren. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die auf der kumulierten Blickdauer basierenden Diskriminationsleistungen überschätzt werden. Infolgedessen wurde das Experiment als eine säuglings- und visuskontrollierte Habituations-Dishabituations-Prozedur realisiert, vergleichbar der Prozedur von Starkey und Cooper.

Stichprobe

Am Experiment nahmen 43 nach Auskunft ihrer Pflegepersonen gesunde, termingerecht geborene (Gestationsalter zwischen 38 und 41 Wochen bei der Geburt) teil; Probleme mit deren Seh- und Hörvermögen waren nicht bekannt. 10 Babys mussten aus der Stichprobe ausgeschlossen werden, da 5 von ihnen nicht habituierten und 5 zu unruhig waren. Die in die Analyse aufgenommenen Babys waren zwischen 175 und 282 Tagen alt (mittleres Alter: 224,9 Tage, SD: 24,2 Tage), 14 Babys waren männlichen, 19 weiblichen Geschlechtes. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegepersonen ein Geburtsgewicht von über 2900g. Die Pflegepersonen wurden über Baby-Gruppen, durch Aushänge bei Kinderärzten und Anzeigen in Lokalzeitungen angeworben. Ein Teilnahme-Entgelt wurde nicht bezahlt.

Stimuli

Mit Hilfe des Programmes Corel Presentations⁷ wurden Dias hergestellt, die computergesteuert über einen Beamer (A+K AstroBeamer 330) auf einen Rückprojektionsschirm (Breite: 92,5 cm, Höhe: 71 cm) projiziert wurden. Der Rückprojektionsschirm war in einen Holzrahmen eingespannt, der in das Prospekt eines kleinen Kasperle-Theaters eingesetzt war und die Vorderseite der Bühne bündig mit dem Boden und den Seitenstreben des Bühnengestelles abschloss (Maße des Bühnenraumes: 110 cm breit, 65 cm tief und 50 cm hoch; der Bühnenraum befand sich 91

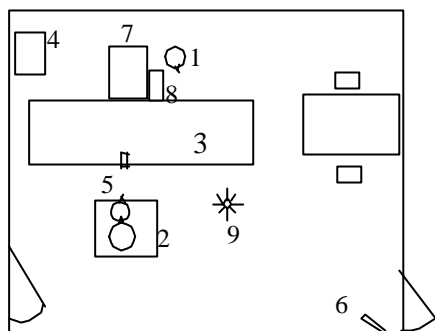
cm über dem Boden). Die Maße der projizierten Dias betragen 23 cm x 35 cm, ihre mittlere Höhsymmetrieachse fiel mit der des Rückprojektionsschirmes zusammen. Ein Dia wurde hergestellt, indem aus einer bei der Projektion nicht sichtbaren, zentrierten 6 x 6 Matrix 2, 3, 4 oder 6 Zellen zufällig ausgewählt wurden, in deren Mitte jeweils ein magentaroter Kreis platziert wurde. Der projizierte Durchmesser eines Kreises betrug 1 cm, der minimale projizierte Abstand zweier Kreise betrug 2 cm und der maximale Abstand 10 cm. Da die Distanz des Kopfes des Babys 80 cm von der projizierten Fläche betrug, wurde ein einzelner Kreis unter einem Sehwinkel von 0.7° , die dichteste Konfiguration unter einem Sehwinkel von 2.2° und die weiteste Konfiguration unter einem Sehwinkel von 8.6° gesehen. Die Leuchtstärke, gemessen am Kopf des Babys (Minolta Illuminanzmeter), betrug stets 600 lx. Der Kontrast zwischen rotem Kreis und gedeckt-weißem Hintergrund des Projektionsschirmes betrug 56.7% (Leuchtdichte der roten Kreise: 29cd/m^2 , Leuchtdichte der benachbarten weißen Umgebung: 105cd/m^2 ; gemessen mit Minolta LS100). Für jedes Baby wurde eine Serie von 24 Dias hergestellt, 20 mit der Numerosität \underline{n} und 4 mit der Numerosität $\underline{n}+1$ oder vice versa (20 mal $\underline{n}+1$ und 4 mal \underline{n}). Diese wurden je nach Versuchsbedingung zu einer Präsentationsserie pro Baby zusammengestellt, wobei jede Serie nur einmal verwendet wurde.

Versuchsablauf

Der Versuch fand in einem mattweiß tapezierten Labor statt (Größe 2,6m x 4,5m), mit Schallschutzdecke, Teppichboden und einem schalldichten Fenster. Die Babys saßen auf dem Schoß der Pflegeperson vor der Bühne, so dass der Abstand des Kopfes des Babys von der Projektionsfläche 80 cm betrug (vgl. Abb. 4-1). Das Gerüst der Bühne war mit beige Veloursstoff verkleidet. Die Pflegepersonen wurden gebeten, die Augen zu schließen. In der Mitte, 3 cm unterhalb des Bühnenprospekts befand sich eine Fingerkamera (Marke Sony, XC-999P), die unterhalb des Bodens des Bühnenraumes auf einen Dreifuß montiert war. Für die Linse war in den Stoff, mit dem das Bühnengerüst umkleidet war, ein exakt passendes Loch geschnitten. Die Fingerkamera wurde so eingestellt, dass der Kopf des Babys gut sichtbar war. Die beobachtende Person hinter der Bühne konnte den Kopf des Babys auf einem Monitor sehen und gegebenenfalls die Kamera nachjustieren. Diese Person (P1) bediente auch den Laptop, um die Dias zu projizieren. Über den Kopfhörer war P1 mit einer zweiten beobachtenden Person (P2) verbunden, die sich in einem anderen Raum befand. Diese konnte anhand von zwei Monitoren und eines Deckenmikrophones im Laborraum (Marke Sennheiser Mikrofon-Modulsystem K6 / ME 62) das Geschehen im Labor verfolgen. Auf einem Monitor war der Kopf des Babys per Fingerkamera zu sehen, auf dem anderen die Projektionsfläche samt Reizkonfigurationen per Deckenkamera. Beide Videosignale wurden aufgenommen, die Signale der Deckenkamera gemeinsam mit denen des Deckenmikrophons und in einen Mischer eingespeist (Marke Panasonic WJ-AVE55), nachdem sie durch zwei Timecodegeneratoren (Alpermann + Velte TCI50I) über einen Timecodeleser (Alpermann + Velte, TC 60 RV 72) mit einem Timecode (VITC) versehen worden waren. Alle Signale aus dem Labor wurden per Videorecorder (Marke Panasonic AG5700-E) aufgenommen. Die Aufgabe von P2 bestand darin, den Versuch on-line zu steuern und die Dauer der Blicke des Babys auf den Reiz und die Dauer der Blicke, die nicht auf den Reiz gerichtet waren, zu registrieren. Während der Blicke auf den Reiz wurde eine Taste der Maus kontinuierlich

gedrückt, und ansonsten losgelassen, womit per Programm die entsprechenden Blickdauern registriert wurden.

Abbildung 4-1: Schema der Versuchsanordnung im Laborraum



Legende:

1 = VersuchleiterIn; 2 = Mutter mit Baby; 3 = Kasperletheater mit Rückprojektionsschirm;
4 = Bildschirm; 5 = Fingerkamera (in Bühne); 6 = Deckenkamera; 7 = Beamer; 8 = Laptop;
9 = Deckenmikrophon

In Abhängigkeit von der Blickdauer steuerte P2 den Versuch und teilte P1 über eine Gegensprechanlage mit, wann ein Durchgang zu starten, wann dieser zu beenden und der nächste zu beginnen war.

Die Kriterien zum Starten und zum Stoppen eines Durchganges waren die folgenden: Das Stop-Kriterium war erfüllt, wenn das Baby mindestens 0,5 sec auf den Reiz und 2 sec vom Reiz weg oder wenn es 30 sec lang überhaupt nicht auf den Reiz geschaut hatte. Dann wurde der nächste Durchgang gestartet. Wenn das Baby viermal hintereinander überhaupt nicht auf den Reiz geschaut hat, wurde der Versuch beendet.

Das Habituationkriterium, bei dessen Erfüllung die Habitationsphase endete und die Testphase begann, war folgendermaßen festgelegt und entsprechend programmiert worden: Zunächst wurde der Mittelwert aus den Blickdauern der ersten drei Durchgänge berechnet (Referenzwert). Mit Beginn des vierten Durchganges wurde das arithmetische Mittel aus immer drei Durchgängen, dem aktuellen und den beiden vorherigen, berechnet. Das Habituationkriterium war erfüllt, wenn der entsprechende Mittelwert kleiner oder gleich 50% des Referenzwertes war. Es konnte demzufolge frühestens ab dem sechsten Durchgang (Mittel aus dem vierten, fünften und sechsten Durchgang) erfüllt werden.

Die Habitationsphase bestand aus maximal 16 Durchgängen, die Testphase aus 8 Durchgängen. In der Testphase wurden alternierend die bekannte und die neue Numerosität präsentiert. Der Beginn der Testphase mit einer bekannten oder einer neuen Numerosität war über die Babys hinweg ausbalanciert und damit das sequentielle Muster aus unterschiedlich vertrauten Numerositäten. Jede Numerosität wurde gleich häufig als Habitations- und als Teststimulus verwendet, woraus 4 Habitationsgruppen resultierten. Gekreuzt mit der Abfolge bekannter und neuer

Numerositäten ergaben sich somit 8 Experimentalgruppen (vgl. Tab. 4-1). In jeder Experimentalgruppe waren in etwa gleich viele männliche und weibliche Babys.

Tabelle 4-1. Versuchsplan

Habitierungsphase	Testphase	
Numerosität	Abfolge "alt - neu" oder "neu - alt"	
2 (n = 9)	(1) (n = 4)	2 - 3
	(2) (n = 5)	3 - 2
3 (n = 8)	(3) (n = 4)	3 - 2
	(4) (n = 4)	2 - 3
4 (n = 7)	(5) (n = 4)	4 - 6
	(6) (n = 3)	6 - 4
6 (n = 9)	(7) (n = 4)	6 - 4
	(8) (n = 5)	4 - 6

Ergebnisse

Für die Gesamtgruppe betrug die mittlere Anzahl bis zum Erreichen des Habitationskriteriums 8,4 Durchgänge (SD: 2,6) (vgl. Tab. 4-2).

Tab. 4-2. Anzahl der Durchgänge (maximal 16) bis zur Habituation

Numerosität	Durchgänge (AM)	Durchgänge (SD)	N
2 vs 3	9.0	2.8	17
4 vs 6	7.7	2.3	16
Gesamtgruppe	8.4	2.6	33

Die Daten der abhängigen Variablen "Blickdauer" wurden mit einer 2x2x2x2-ANOVA (gemischtes Modell) ausgewertet (Modul GLM aus SPSS8). Die Zwischensubjektfaktoren waren "Diskrimination" (2vs3 x 4vs6), "Präsentation" als Abfolge der vertrauten und der neuen Numerositäten in der Testphase (alt-neu x neu-alt) und "Geschlecht" (männlich x weiblich). Der Innersubjektfaktor war die Neuigkeit (vertraute Numerosität x neue Numerosität). Die Auswertung basiert auf den Summen der Blickdauern über die 4 Testdurchgänge jeweils der vertrauten oder der

neuen Numerositäten. Allen inferenzstatistischen Prüfungen wurde ein α -Niveau von $p=.05$ zugrunde gelegt.

Signifikant wurde nur der Haupteffekt Neuigkeit (Wilks $\lambda = .80$; $F(1;25) = 6.25$) und die Wechselwirkung Diskrimination x Neuigkeit (Wilks $\lambda = .86$; $F(1;25) = 4.21$). Alle anderen Effekte waren insignifikant. Eine Folgeanalyse zeigt, in welchem unterschiedlichem Ausmaß sich der Neuigkeitseffekt in beiden Diskriminationsbedingungen abbildet: In der Diskriminationsbedingung 2vs3 sehen die Babys signifikant länger auf die noch nicht gesehene Numerosität ($F(1;31) = 10.56$; mittlere Differenz (bekannt-neu) = -4660msec), wohingegen sich in der Diskriminationsbedingung 4vs6 die Blickdauern bei bekannter und neuer Numerosität nicht bedeutsam unterscheiden ($F(1;31) = 0.28$; mittlere Differenz (bekannt-neu) = -777msec) (vgl. Tab. 4-3).

Tabelle 4-3.. Numerosität-Diskrimination 2vs3 - 4vs6*

Numerosität-Diskrimination		habituierte Numerosität	neue Numerosität
2 vs 3	AM (msec)	8062	12722
	N	17	17
	SD (msec)	3601	7983
4 vs 6	AM (msec)	12281	13058
	N	16	16
	SD (msec)	10498	11079
Total	AM (msec)	10107	12885
	N	33	33
	SD (msec)	7920	9457

* Die Mittelwerte und Streuungen basieren auf den Summen aus jeweils 4 Testdurchgängen

Der Unterschied zwischen den Differenzen (bekannt-neu) der Diskriminationsbedingungen ist signifikant ($t(31) = -1.89$; einseitig). Von den 33 Babys schauten 20 (60.6%) länger auf die neuen Numerositäten, wobei diese Blickdauer um durchschnittlich 88% länger war als die Blickdauer auf die vertrauten Numerositäten. Im Gegensatz stand eine 25% kürzere Blickdauer auf die neuen Numerositäten bei den anderen 13 Babys (39.4%).

In einer weiteren Analyse wurde geprüft, ob die Habituation auf die unterschiedlichen Numerositäten (vgl. Tab. 4-4) einen Effekt auf die Blickdauer in der Testphase hatte. Eine ANOVA mit den Zwischensubjektfaktoren "Habituationsbedingung" (2, 3, 4 oder 6 Kreise), "Präsentation" als Abfolge der vertrauten und der neuen Numerositäten in der Testphase (alt-neu x neu-alt) und dem Innersubjektfaktor "Neuigkeit", erbrachte neben dem signifikanten Neuigkeitseffekt ($F(1;25) = 7.14$) keine weiteren signifikanten Effekte (Habituationsbedingung $F(3;25) = 0.23$; Präsentation $F(1;25) = 0.07$; Habituationsbedingung x Präsentation $F(3;25) = 1.4$; Habituationsbedingung x Neuigkeit $F(1;25) = 1.67$; Präsentation x Neuigkeit $F(1;25) = 0.27$; Habituationsbedingung x Präsentation x Neuigkeit $F(3;25) = 2.75$).

Tabelle 4-4. Numerosität-Diskrimination in den unterschiedlichen Habituationsbedingungen

Numerosität-Diskrimination	Habituationsbedingung		habituierte Numerosität (Test)	neue Numerosität (Test)
2 vs 3	2	AM (msec)	7629	12010
		N	9	9
		SD (msec)	3664	8624
	3	AM (msec)	8550	13525
		N	8	8
		SD (msec)	3714	7699
4 vs 6	4	AM (msec)	13907	14377
		n	7	7
		SD (msec)	12589	12299
	6	AM (msec)	11017	12032
		N	9	9
		SD (msec)	9148	10677

Zur Beantwortung der Frage, ob die Babys auf neue Teststimuli dishabituieren und auf die vertrauten nicht, wurde die Blickdauer des letzten Habituationsdurchganges der Babys mit der Blickdauer des ersten Testdurchganges verglichen (vgl. Tabelle 4-5). Im Falle der gleichen Numerosität ist die Blickdauerzunahme im ersten Testdurchgang statistisch nicht bedeutsam ($t(15) = -1.473$, $p=.16$, 2seitig), im Falle verschiedener Numerositäten statistisch bedeutsam ($t(16) = -2.148$, $p=.047$, 2seitig) verändert.

Tabelle 4-5. Blickdauer letzter Habituationsdurchgang - erster Testdurchgang

Übereinstimmung der Numerosität letzter Hab.dg. - erster Testdg.		Blickdauer letzter Habituationsdurchgang	Blickdauer erster Testdurchgang
gleiche Numerosität	AM (msec)	1978	2987
	N	16	16
	SD (msec)	1647	3200
verschiedene Numerosität	AM (msec)	1661	3368
	N	17	17
	SD (msec)	882	3244
Total	AM (msec)	1815	3183
	N	33	33
	SD (msec)	1298	3178

Diskussion des Experimentes 4

Werden Babys kleine Objektnumerositäten wiederholt gezeigt, so lässt sich anhand kürzer werdender Blickdauern feststellen, dass sie trotz immer wieder anders aussehender Konfigurationen der Objekte das Gemeinsame dieser Darstellungen erkennen. Dieses Gemeinsame ist die Anzahl bzw. die Numerosität der Objekte. Sie betrachten nach der Gewöhnung an eine bestimmte Numerosität eine unmittelbar im Anschluss daran gezeigte neue Numerosität länger, was für die Abstraktion der Numerosität aus dem Gezeigten spricht. Der Neuigkeitseffekt ist statistisch bedeutsam: Die Babys bemerken die Veränderung der Numerosität, wenn ihnen die vertraute abwechselnd mit einer neuen Numerosität gezeigt wird. Allerdings bleibt diese Reaktion auf bestimmte Mächtigkeiten beschränkt. So werden nur die Numerositäten 2 und 3 unterschieden, nicht aber die Numerositäten 4 und 6. Die Komplexität, die daraus resultiert, dass 4 oder 6 Kreise komplexere Konfigurationen bilden, tendenziell unter einem größeren Sehwinkel wahrgenommen und daher schwieriger zu unterscheiden sind, scheint für diesen Effekt nicht verantwortlich zu sein, da die Habituationsbedingung keinen Einfluss auf den Neuigkeitseffekt hatte. Die Differenz zwischen vertrauter und neuer Numerosität in der Testphase hing also nicht davon ab, ob die vertraute Numerosität größer oder kleiner war als die neue. Da auch nicht von Bedeutung war, ob in der Testphase mit der vertrauten oder der neuen Numerosität begonnen wurde, scheint die Stimuluskomplexität keine Rolle zu spielen. Allerdings deutet die höhere Streuung in der Bedingung 4vs6 darauf hin, dass diese Numerositäten für die Babys tendenziell schwieriger waren. Im Gegensatz dazu fanden Starkey, Spelke und Gelman (1990) einen Einfluss der Testabfolge von vertrauten und neuen Numerositäten. Diese Befunde lassen es wahrscheinlich erscheinen, dass der Neuigkeitseffekt in erster Linie von der Numerosität der Diskriminanda verursacht wird.

Der Neuigkeitseffekt wird von der Mächtigkeit der Numerositäten moderiert: Es werden nur die kleineren Numerositäten unterschieden, obwohl die Numerositäten beider Diskriminationsbedingungen im gleichen Verhältnis stehen. Dies bedeutet eine Einschränkung des Weberschen Gesetzes, demzufolge das Verhältnis der Differenz Standard-Vergleichsreiz zum Standardreiz konstant bleibt und die gerade überschwellige Diskriminierbarkeit von Standard- und Vergleichsreiz kennzeichnet. Die Diskriminierbarkeit von kleinen Numerositäten beruht also auf Mechanismen, die dem Weberschen Gesetz nicht folgen. Einen vergleichbaren Befund erzielten Starkey und Cooper (1980) in einer Studie, in der Babys die Numerositäten 2 und 3 unterschieden, aber nicht 4 und 6.

Immerhin zeigen einige Babys, dass sie 4 von 6 unterscheiden können; hinzu kommt, dass sie auf 4 aber auch auf 6 Punkte habituierten. Es ist näher zu betrachten, was die Habituation auf eine Numerosität wie 4 oder 6 bedeutet. Obwohl sich die Konfigurationen der Kreise von Durchgang zu Durchgang ändern, lässt die Blickdauer und damit die Aufmerksamkeit von Durchgang zu Durchgang nach. Dieses Nachlassen der Aufmerksamkeit kann daher auf die gleichbleibende Numerosität zurückgeführt werden. In der Testphase gibt es aber keinen Neuigkeitseffekt, das heißt, die Babys schauen den Testreiz 4 und den Testreiz 6 gleich lange an, egal, ob sie auf 6 oder 4 Kreise habituiert worden sind. Daraus kann geschlossen werden, dass sie die beiden Numerositäten nicht unterscheiden können.

Zum besseren Verständnis dieser Überlegungen seien die Ergebnisse einiger post hoc-Analysen berichtet. Vergleicht man die Differenz zwischen der Blickdauer des letzten Habituationsdurchgangs und der Blickdauer des ersten Testdurchgangs getrennt nach den Diskriminationsbedingungen, dann lässt sich ein signifikanter Unterschied in der Bedingung 2vs3 Kreise feststellen ($t(16) = -2.29$, $p = .036$, 2seitig; $AM(hab) = 1565\text{msec}$, $SD(hab) = 985\text{msec}$; $AM(testdg1) = 3245\text{msec}$, $SD(testdg1) = 3314\text{msec}$), aber nicht in der Bedingung 4vs6 Kreise ($t(15) = -1.36$, $p = .193$, 2seitig; $AM(hab) = 2079\text{msec}$, $SD(hab) = 1555\text{msec}$; $AM(testdg1) = 3118\text{msec}$, $SD(testdg1) = 3134\text{msec}$). Damit ist nochmals bestätigt, dass der unterschiedliche Neugigkeitseffekt einem unterschiedlichen Dishabituationseffekt entspricht und stützt den Schluss, dass die Babys 4 von 6 Kreisen nicht unterscheiden können. Zusätzliche Evidenz liefert der post hoc-Vergleich der Blickdauern der unterschiedlichen Habituationgruppen aus der Testphase bei gleichen Numerositäten: Der Gruppe, die auf 3 habituiert wurde, ist in der Testphase 3 vertraut ($AM = 8550\text{msec}$; $SD = 3714\text{msec}$) und 2 neu ($AM = 13525\text{msec}$; $SD = 7699\text{msec}$). In der Gruppe, die auf 2 habituiert wurde, ist 3 neu ($AM = 13525\text{msec}$; $SD = 8624\text{msec}$) und 2 in der Testphase vertraut ($AM = 7629\text{msec}$; $SD = 3663\text{msec}$). Der Unterschied zwischen "2vertraut-2neu" ist bedeutsam ($t(16) = -2.06$, $p = .028$, 2seitig), der zwischen "3vertraut-3neu" tendenziell ($t(16) = -1.51$, $p = .075$, 2seitig). Sowohl beim Vergleich "4vertraut-4neu" ($AM(4vertraut) = 13907\text{msec}$, $SD = 12588\text{msec}$; $AM(4neu) = 12032\text{msec}$, $SD = 10677\text{msec}$) ($t(15) = 0.323$, $p = .624$, 2seitig) als auch beim Vergleich "6vertraut-6neu" ($AM(6vertraut) = 11017\text{msec}$, $SD = 9148\text{msec}$; $AM(6neu) = 14377\text{msec}$, $SD = 12299\text{msec}$) ($t(15) = -0.628$, $p = .269$, 2seitig) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

Es könnte aber auch sein, dass bei den größeren Numerositäten das Ausmaß der Habituation durch das gesetzte Habituationkriterium unterschätzt wird, so dass in der Testphase ein vertrauter Stimulus größerer Numerosität weniger vertraut ist als ein Stimulus geringerer Numerosität. Dies würde jedoch an der Schlussfolgerung nichts ändern, dass das Erfassen und Diskriminieren größerer Numerositäten mehr Aufmerksamkeit erfordert.

4. 4. 1. 2 Experiment 5

Für Erwachsene ist gut belegt, dass die obere Grenze des Erfassens und Diskriminierens kleiner Numerositäten im visuellen Bereich bei 3 oder 4 Objekten liegt (z.B. Trick & Pylyshyn, 1994a, b), ähnliches ließ sich bei Kindern zwischen 2 bis 5 Jahren finden (Starkey & Cooper, 1995). Ein vergleichbares Ergebnis auch für das Säuglingsalter spräche für einen altersinvarianten Mechanismus des Subitizing. Da die Babys 2 von 3 Elementen unterschieden haben, aber nicht 4 von 6, stellt sich die Frage, ob sie auch 3 Elemente erkennen können. Zwar ließe sich aus dem fehlenden Effekt der Habituationbedingung aus Experiment 4 folgern, dass die Babys auch 3 Objekte enumerieren können, weil sowohl 2 als auch 3 Kreise einen Neugigkeitseffekt auf ungefähr gleichem Blickdauerniveau ergeben. Da es sich jedoch um eine Diskrimination und nicht um eine Identifikation von Numerositäten handelt, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Diskriminanda wechselseitig beeinflussen (vgl. Laming, 1986). Es wurde daher im Experiment 5 analog dem Experiment 4 eine Bedingung realisiert, in der 3 vs 4 und 4 vs 5 Kreise diskriminiert werden sollten.

Stichprobe

Am Experiment nahmen 49 nach Auskunft ihrer Pflegepersonen gesunde, termingerecht geborene Babys teil (vgl. Experiment 4). Probleme mit dem Sehen und Hören waren nicht bekannt. 9 Babys konnten in der Stichprobe nicht belassen werden, da 4 von ihnen nicht habituierten und 5 unruhig oder unaufmerksam waren. Die in die Analyse aufgenommenen Babys waren zwischen 180 und 429 Tagen alt (mittleres Alter: 217,4 Tage, SD: 38,7 Tage), 21 Babys waren männlichen, 19 weiblichen Geschlechtes. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegepersonen ein Geburtsgewicht von über 2900 g. Die Pflegepersonen wurden über Baby-Gruppen, durch Aushänge bei Kinderärzten und Anzeigen in Lokalzeitungen angeworben.

Stimuli und Versuchablauf

Die Stimuli unterschieden sich außer in der Numerosität nicht von denjenigen aus Experiment 4. Es wurden Numerositäten der Mächtigkeit 3, 4 und 5 nach dem bei Experiment 4 genannten Verfahren hergestellt. Ansonsten wurde der Versuch in der selben Weise wie Experiment 4 durchgeführt (vgl. Tab. 4-6).

Tabelle 4-6. Versuchsplan

Habituiierungsphase	Testphase	
Numerosität	Abfolge "alt - neu" oder "neu - alt"	
3 (n = 10)	(1) (n = 5)	3 – 4
	(2) (n = 5)	4 – 3
4 (n = 10)	(3) (n = 5)	4 – 3
	(4) (n = 5)	3 – 4
4 (n = 10)	(5) (n = 5)	4 – 5
	(6) (n = 5)	5 – 4
5 (n = 10)	(7) (n = 5)	5 – 4
	(8) (n = 5)	4 – 5

Ergebnisse

Für die Gesamtgruppe betrug die mittlere Anzahl der Durchgänge bis zum Erreichen des Habituationkriteriums 8,2 Durchgänge (SD=2,6) (vgl. Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7. Anzahl der Durchgänge (maximal 16) bis zur Habituation

Numerosität	Durchgänge (AM)	Durchgänge (SD)	N
3 vs 4	8.3	2.7	20
4 vs 5	8.2	2.5	20
Gesamtgruppe	8.2	2.6	40

Die abhängige Variable "Blickdauer" wurde mittels einer 2x2x2x2-ANOVA (gemischtes Modell) analysiert (Modul GLM aus SPSS8). Die Zwischensubjektfaktoren waren "Diskrimination" (3vs4 x 4vs5), "Präsentation" als Abfolge der vertrauten und der neuen Numerositäten in der Testphase, (alt-neu x neu-alt) und "Geschlecht" (männlich x weiblich). Der Innersubjektfaktor war die "Neuigkeit" (vertraute Numerosität x neue Numerosität). Die Auswertung basiert auf den Summen der Blickdauern über die jeweils 4 Testdurchgänge der vertrauten und neuen Numerositäten.

Allen inferenzstatistischen Prüfungen wurde ein α -Niveau von $p=.05$ zugrunde gelegt. Signifikant wurde nur der Haupteffekt Neuigkeit (Wilks $\lambda = .79$; $F(1;32)=8.72$) und die Wechselwirkung Diskrimination x Neuigkeit (Wilks $\lambda = .82$; $F(1;32)=7.14$). Alle anderen Effekte waren insignifikant. Eine Folgeanalyse zeigt, in welchem unterschiedlichem Ausmaß sich der Neuigkeitseffekt in beiden Diskriminationsbedingungen abbildet: In der Diskriminationsbedingung 3vs4 sehen die Babys signifikant länger auf die noch nicht gesehene Numerosität ($F(1;38)=14.37$; mittlere Differenz(bekannt-neu)=-4361msec; $SD= 1243$ msec), wohingegen sich in der Diskriminationsbedingung 4vs5 die Blickdauern bei bekannter und neuer Numerosität nicht bedeutsam unterscheiden ($F(1;38)=0.16$; mittlere Differenz (bekannt-neu)=-465msec; $SD= 1049$ msec) (vgl. Tab. 4-8).

Tabelle 4-8. Numerosität-Diskrimination 3vs4 - 4vs5*

Numerosität-Diskrimination		habituierte Numerosität	neue Numerosität
3 vs 4	AM (msec)	7709	12070
	N	20	20
	SD (msec)	4536	8987
4 vs 5	AM (msec)	11406	11870
	N	20	20
	SD (msec)	6299	7606
Total	AM (msec)	9664	12911
	N	40	40
	SD (msec)	6222	13567

* Die Mittelwerte und Streuungen basieren auf den Summen aus jeweils 4 Testdurchgängen

Der Unterschied zwischen den Differenzen (bekannt-neu) der Diskriminationsbedingungen ist signifikant ($t(38) = -2.39$; einseitig). Von den 40 Babys schauten 31 (77.5%) länger auf die neuen Numerositäten, wobei diese Blickdauer im Mittel 51% länger war als die Blickdauer auf die vertrauten Numerositäten. Bei den anderen 9 Babys (23%) war die Blickdauer 22.5% kürzer.

In einer weiteren Analyse wurde geprüft, ob die Habituation auf die unterschiedlichen Numerositäten (vgl. Tab. 4-9) einen Effekt auf die Blickdauer in der Testphase hatte. Eine ANOVA mit den Zwischensubjektfaktoren "Habituationsbedingung" (3, 4, und 5 Kreise),"Präsentation" als Abfolge der vertrauten und der neuen Numerositäten in der Testphase (alt-neu x neu-alt) und dem Innersubjektfaktor "Neuigkeit", erbrachte neben dem signifikanten Neuigkeitseffekt ($F(1;32)=8.26$) keine weiteren signifikanten Effekte (Habituationsbedingung $F(3;32)=0.42$; Präsentation $F(1;32)=1.28$; Habituationsbedingung x Präsentation $F(3;32)=0.28$; Habituationsbedingung x Neuigkeit $F(3;32)=2.06$; Präsentation x Neuigkeit $F(1;32)=2.38$; Habituationsbedingung x Präsentation x Neuigkeit $F(3;32)=0.17$).

Tabelle 4-9. Numerosität-Diskrimination in den unterschiedlichen Habituationsbedingungen

Numerosität-Diskrimination	Habituationsbedingung		habituierte Numerosität (Test)	neue Numerosität (Test)
	3 vs 4	3	AM (msec)	6831
N			10	10
SD (msec)			3347	5508
4		AM (msec)	8588	13424
		N	10	10
		SD (msec)	5525	11665
4 vs 5	4	AM (msec)	11448	10965
		N	10	10
		SD (msec)	6500	6292
	5	AM (msec)	11363	12775
		N	10	10
		SD (msec)	6443	8985

Zur Beantwortung der Frage, ob die Babys bei neuen Teststimuli dishabituierten und bei vertrauten nicht, wurde die Blickdauer des letzten Habituationsdurchganges der Babys mit der Blickdauer des ersten Testdurchganges verglichen (vgl. Tabelle 4-10). Die Differenz der Blickdauer des letzten Habituationsdurchganges und der Blickdauer des ersten Testdurchganges wurde in einer Varianzanalyse mit den Faktoren "Übereinstimmung der Numerosität" (Numerosität des ersten Testdurchganges stimmt mit der Numerosität des letzten Habituationsdurchganges überein oder nicht), "Diskriminationsbedingung" (3vs4 und 4vs5) und der Differenz "letzter Habituationsdurchgang-erster Testdurchgang" überprüft. Es resultierte ein signifikanter Haupteffekt der Differenz "letzter Habituationsdurchgang -erster Testdurchgang" ($F(1;36)=17.25$, $p=.000$), ein tendenziell signifikanter Haupteffekt der Diskriminationsbedingung ($F(1;36)=3.42$, $p=.073$) und eine tendenziell signifikante Wechselwirkung aus "Übereinstimmung der Numerosität" und "Differenz" ($F(1;36)=3.27$, $p=.079$). Alle anderen Effekte sind insignifikant ("Übereinstimmung" $F(1;36)=.09$, $p=.76$; "Übereinstimmung x Diskriminationsbedingung" $F(1;36)=.07$, $p=.792$; "Diskriminationsbedingung" x "Differenz" $F(1;36)=1.51$, $p=.228$; "Übereinstimmung" x "Diskriminationsbedingung" x "Differenz" $F(1;36)=.80$, $p=.378$).

Tabelle 4-10. Blickdauer letzter Habitationsdurchgang - erster Testdurchgang

Übereinstimmung der Numerosität letzter Habitations- erster Testdurchgang		Blickdauer letzter Habitationsdurchgang	Blickdauer erster Testdurchgang
gleiche Numerosität	AM (msec)	2131	3032
	N	20	20
	SD (msec)	1353	2637
verschiedene Numerosität	AM (msec)	1613	3907
	N	20	20
	SD (msec)	1385	3048
Gesamt	AM (msec)	1872	3470
	N	40	40
	SD (msec)	1376	2848

Betrachtet man den Numerositätseffekt, so zeigt sich, dass sowohl in der Diskriminationsbedingung 3vs4 die Differenz der Blickdauer im letzten Habitationsdurchgang und der im ersten Testdurchgang signifikant von 0 verschieden ist ($t(19) = -2.291$, $p = .034$, 2seitig; $AM(hab) = 1571\text{msec}$, $SD = 1065\text{msec}$; $AM(testdg1) = 2696\text{ms}$, $SD = 1787\text{ms}$) als auch in der Diskriminationsbedingung 4vs5 ($t(19) = -3.345$, $p = .003$, 2seitig; $AM(hab) = 2173\text{msec}$, $SD = 1601\text{msec}$; $AM(testdg1) = 4243\text{ms}$, $SD = 3492\text{msec}$). Bei gleicher Numerosität verändert sich die Blickdauer im ersten Testdurchgang statistisch nicht bedeutsam ($t(19) = 1.588$, $p = .13$, 2seitig), im Gegensatz zur Blickdauer bei nicht übereinstimmenden Numerositäten zwischen letztem Habitationsdurchgang und erstem Testdurchgang ($t(19) = -4.382$, $p = .000$, 2seitig).

Des weiteren wurden a posteriori Vergleiche der Blickdauern aus der Testphase bei gleichmächtigen Numerositäten zwischen den Gruppen durchgeführt. So ist der Gruppe, die auf 3 habituiert wurde, 3 in der Testphase vertraut (vgl. Tab. 4-9) und 4 neu, während der Gruppe, die auf 4 habituiert wurde, in der Testphase 3 neu und 4 vertraut ist. Der Unterschied zwischen "3vertraut-3neu" ist tendenziell bedeutsam ($t(18) = -1.72$, $p = .10$, 2seitig), der zwischen "4vertraut-4neu" ist insignifikant ($t(18) = -0.86$, $p = .40$, 2seitig). In der Diskriminationsbedingung 4vs5 ist sowohl der Vergleich "4vertraut-4neu" insignifikant ($t(18) = -0.38$, $p = .71$, 2seitig) als auch der Vergleich "5vertraut-5neu" ($t(18) = 0.14$, $p = .89$, 2seitig). Da in den Bedingungen 3vs4 und 4vs5 die Numerosität 4 sowohl als vertrauter als auch als neuartiger Stimulus fungierte, wurden die vertrauten und neuartigen Stimuli aus beiden Bedingungen miteinander verglichen. Der Vergleich 4vertraut(3vs4) - 4vertraut(4vs5) (vgl. Tab.4-9) stellte sich als insignifikant heraus ($t(18) = -1.06$, $p = .30$, 2seitig), ebenso wie der Vergleich 4neu(3vs4)-4neu(4vs5) ($t(18) = -0.62$, $p = .55$).

4. 4. 1. 3 Diskussion der Experimente 4 und 5

Das Experiment 4 sollte die Frage klären, ob Babys 3 von 4 Numerositäten unterscheiden können, in Experiment 5 wurde überprüft, ob sie die Numerositäten 3vs4 und 4vs5 diskriminieren können. Babys gewöhnen sich an unterschiedlich aussehende Konfigurationen aus Kreisen; werden ihnen solche wiederholt gezeigt, nimmt die Blickdauer ab. Die Blickdauer nimmt wieder bedeutsam zu,

wenn ihnen in der Testphase abwechselnd die vertraute und eine neue Kreiskonfiguration gezeigt werden, wobei sich die neuen Konfigurationen nur in jeweils einem Element von den vertrauten Konfigurationen unterscheiden. Dieser Neuigkeitseffekt geht auf die Veränderung der Numerosität zurück und hängt von der Mächtigkeit der Numerosität ab. Jedoch ist der Neuigkeitseffekt nur in der Bedingung 3 vs 4 Objekte bedeutsam, nicht in der Bedingung 4 versus 5 Objekte. Das bedeutet, dass die Babys 3 von 4 Objekten unterscheiden können, aber nicht 4 von 5 Objekten. Ein Effekt der höheren Komplexität bei größeren Numerositäten kann ausgeschlossen werden, da der Neuigkeitseffekt nicht davon abhängt, ob die Babys auf die kleinere Numerosität habituiert und dann mit der größeren getestet wurden oder vice versa. Dies wird auch dadurch belegt, dass es im Gegensatz zur Studie von Starkey, Spelke und Gelman (1990) keine Rolle spielte, ob in der Testphase mit dem neuen oder dem vertrauten Stimulus begonnen wurde. Der Neuigkeitseffekt kann also mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Numerosität der Stimuli zurückgeführt werden.

Diese Annahme wird auch dadurch gestützt, dass die Babys bedeutsam länger auf den ersten Teststimulus als auf den letzten Habituationsstimulus blicken. Stimmt die Numerosität zwischen dem habituierten Stimulus und dem ersten Teststimulus überein, tritt im Gegensatz zur Diskrepanz beider Numerositäten keine Sensitivierung auf. Sollten die Babys den vertrauten Stimulus nicht von dem neuen unterscheiden können, dann wäre zumindest in der Diskriminationsbedingung 4 versus 5 zu erwarten, dass die Sensitivierung ausbleibt. Es ist jedoch zu bedenken, dass dieser Vergleich wenig reliabel ist, da er nur auf einem Durchgang pro Baby beruht. Allerdings findet sich nicht nur bei der Diskrimination 3 vs 4 die erwartungskonforme Sensitivierung, sondern auch bei 4 vs 5 Numerositäten. Dies bedeutet zunächst, dass der Sensitivierungseffekt und der Neuigkeitseffekt unterschiedlich ausfallen. Betrachtet man ausschließlich den Sensitivierungseffekt, wird nahegelegt, dass Babys auch 4 von 5 unterscheiden können (vgl. Treiber & Wilcox (1984). Jedoch sollte der Sensitivierungseffekt vorsichtig interpretiert werden, nicht nur, weil er auf dem wenig reliablen Vergleich zweier einzelner Durchgänge beruht, sondern weil der erste Vergleich eines vertrauten und eines neuen Reizes relativ leicht ist. Schließlich wurde der vertraute Stimulus erheblich länger gesehen und damit die Chance erhöht, das Gemeinsame der Habituationsstimuli zu abstrahieren. Da die meisten Babys kriteriumsgemäß habituierten und damit ihre Blickdauer im letzten Habitationsdurchgang auf die Hälfte des Mittelwertes aus den ersten drei Durchgängen abgefallen war, wurden Eigenschaften der Habituationsstimuli so verarbeitet, dass diese keine Aufmerksamkeit mehr erregten. Die Habitationsstimuli verlieren sukzessive ihren Signalcharakter und gehen in Rauschen über. Eine Veränderung ist leicht zu entdecken und eher vom Typ einer Inkrementdetektion als vom Typ einer Differenzdetektion (Laming, 1986). Da in der Testphase die Numerosität in jedem Durchgang wechselt, ist das Unterscheiden schwerer und es wird gewissermaßen die Stabilität und die Reliabilität der Sensitivierung erfasst. Die Babys können den Unterschied zwischen 4 und 5 Objekten nicht stabil und reliabel feststellen, aber den Unterschied von 3 und 4 Objekten. Auch der a posteriori Vergleich zwischen vertrauten und neuen Numerositäten gleicher Numerosität, der auf Blickdauern aus unterschiedlichen Diskriminationsbedingungen beruht, zeigt, dass der Sensitivierungseffekt vorsichtig interpretiert werden muss. Dies lässt sich auch im Vergleich mit der Methode der fixen Darbietungszeit und der alleinigen Untersuchung des Sensitivierungseffektes, wie dies Treiber und Wilcox (1984) durchführten, erkennen, da diese Vorgehensweise die Diskriminationsleistung eher

überschätzt. Allerdings kann man davon ausgehen, dass die obere Grenze des visuellen Diskriminierens kleiner Objektmengen statistischer Natur ist und sowohl intra- und interindividuellen Differenzen unterliegt. Wird diese Grenze über den reliableren Neuigkeitseffekt geschätzt, so lässt sie sich bei 3 Objekten verorten; über den einmalig gemessenen Sensitivierungseffekt gemessen scheint sie bei 4 Objekten zu liegen. Verglichen mit den Numerositätsdiskriminationsstudien bei Erwachsenen ist davon auszugehen, dass die interindividuell festzustellende Streubreite der Babys bei ca. 1 Objekt und die Obergrenze des visuellen Diskriminierens kleiner Objektmengen im Bereich von 3 bis 4 Numerositäten liegt.

Weiterhin lässt sich festhalten, dass der Weber-Bruch des Diskriminierens visuell präsentierter kleiner Numerositäten bei ca. 7 Monate alten Säuglingen etwa bei 25% und damit um ca. 10% über demjenigen von Erwachsenen liegt (van Oeffelen & Vos, 1982). Des Weiteren gilt das Weber-Fechner Gesetz im Bereich kleiner Numerositäten nur eingeschränkt. Dies stützt die Annahme eines eigenständigen, womöglich auf exakten Repräsentationen basierenden Mechanismus, wie der des Subitizing bei Erwachsenen. Da Säuglinge nicht verbal zählen, können die Numerositätsdiskriminationsleistungen der Säuglinge als precounting subitizing interpretiert werden. Dafür spricht auch, dass die Obergrenze dieser Diskriminationsleistung von 3 oder 4 dem Modalwert entspricht, der in den diversen Studien zum Subitizing mit Erwachsenen gefunden wurde (vgl. Trick & Pylyshyn, 1994a) und der sich auch mit der Methode der ZGF identifizieren ließ (vgl. Kap. 3). Weiterhin spricht für das precounting subitizing, dass für größere Numerositäten das Weber-Fechner Gesetz zu gelten scheint. Eine Vorstudie, die methodisch-technisch wie das Experiment 4 ablief und an der 10 Kinder teilnahmen, ergab, dass im Mittel 7 Monate alte Säuglinge 6 von 12 Punkten unterscheiden konnten, aber nicht 6 von 8. Dies stimmt mit einer Studie von Xu und Spelke (2000) überein, in der im Mittel 6 Monate alte Kinder 8 von 16 Punkten, aber nicht 8 von 12 Punkten unterscheiden konnten. Der Weber-Bruch von 8 vs 12 entspricht aber dem von 2 vs 3 (33%), was bedeutet, dass das Weber-Fechner Gesetz für kleine Numerositäten nicht oder nur eingeschränkt gilt. Anscheinend verfügen Säuglinge über eine den Erwachsenen vergleichbare Kompetenz, relative Numerositätsdifferenzen bei einem Weber-Bruch von ca. 50% zu diskriminieren und approximativ zu repräsentieren (vgl. den Distanzeffekt bei Erwachsenen; Dehaene, 1989). Nicht eindeutig ist allerdings aufgrund welcher Stimulusinformationen diese Diskriminationen möglich sind. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Kontrast oder Flächenextension diese Diskrimination fördern, da die diskrete Punktezahl mit der Fläche kovariiert. Xu und Spelke (2000) verdoppelten daher die mittlere Fläche der Punkte in den 8er-Habituationsdisplays verglichen mit der der 16er-Habituationsdisplays, die jedoch eine doppelt so hohe mittlere Elementendichte hatten. In den Testdisplays waren die 16er Displays doppelt so breit wie die 8er Displays, aber die mittlere Punktedichte in beiden Displays war gleich. Leider teilen Xu und Spelke nicht mit, ob der Versuch, die Kovariation zwischen Anzahl, mittlerer Elementendichte und mittlerer Fläche zu kontrollieren erfolgreich war.

Diese empirischen Befunde deuten darauf hin, dass Säuglinge kleine und größere Numerositäten in unterschiedlicher Weise unterscheiden. Zwar kann der Vorgang des Zählens als eine sukzessive Diskrimination verstanden werden, aber diese geschieht durch das Zuweisen eines eindeutigen artifiziellen Symbols zu einem Element. Nacheinander werden jeweils gezählte Diskriminanda zu den gezählten Elementen hinzugefügt und ein neues, noch zu zählendes

Diskriminandum der zu zählenden Elementen, entsteht. Durch die Verwendung der Zählreihe wird es möglich, Mengen, die aus diskreten Elementen bestehen, unabhängig von deren absoluter und relativer Größendifferenz, unterscheidend zu bestimmen. Dies liegt beim Mengenerfassen der Säuglinge nicht vor, deren Unterscheidungsfähigkeit bei Numerositäten größer als 4 von der relativen Differenz der Mengendiskriminanda abhängt. Die relative Mengendiskrimination kann jedoch nicht als Zählen aufgefasst werden, da neben dem nominalen Zahlenaspekt (Bildung einer Einheit) nur der ordinale Aspekt im Sinne von “mehr” oder “weniger” bedeutsam ist. Es ist wenig plausibel, dass bei der Diskrimination größerer Numerositäten die einzelnen Objekte sukzessive durch Abzählen eine Kardinalzahl zugeordnet bekommen. Die Anzahldiskrimination, die durch das Weber-Fechner Gesetz beschrieben werden kann, funktioniert, indem relative Differenzen der Numerositäten berechnet werden. Die Information, die ein solcher Mechanismus verwertet, wird aus Teilmengengrößen, Kontrasten oder Objektdistanzen ermittelt. Allik und Tuulmets (1991) konnten mit ihrem “occupancy model” ein empirisch gut gestütztes Modell der relativen Numerositätsdiskrimination entwickeln, das auf der Analyse der relativen Flächenbelegung durch zweidimensionale Musterelemente beruht. Derartige Mechanismen basieren auf approximativen Repräsentationen nicht zuletzt deswegen, weil eine Element für Element individuierte Erfassung der exakten Menge sehr schnell an die Grenzen der Verarbeitungsressourcen stoßen würde. Alle schon erfassten Elemente müssten markiert und diese Markierungen stets neu überprüft werden, was Ausdruck koordinativer Komplexität wäre (vgl. Kliegl, Mayr und Krampe, 1994). Die relative Numerositätsdiskrimination umgeht oder reduziert zumindest die Verarbeitungsanforderungen, die mit koordinativer Komplexität verbunden sind. Im Falle kleinerer Numerositäten stellt sich das Problem der koordinativen Komplexität in erheblich geringerem Umfang. Modelle wie das FINST-Modell oder der objektbasierten Aufmerksamkeit (Kanwisher & Driver, 1992), erläutern die Mechanismen des visuellen Folgens sowohl einzelner dynamischer Elemente (“track keeping problem”) als auch der gesamten kleinen Numerosität (bis ca. 4). Durch solche Mechanismen kann eine kleine Numerosität von Elementen mit unterschiedlichen Eigenschaften individuiert werden. Säuglinge repräsentieren diesem Modell zufolge kleine Numerositäten nicht als Menge einer bestimmten Kardinalität, sondern als distinkte Objekte (vgl. ähnliche Überlegungen bei Meltzoff & Moore, 1998). Die Annahme, dass es sich um die Repräsentation der Kardinalität handeln müsse, ist höchstens für Erwachsene plausibel, die im Bereich bis 10 über eine hochautomatisierte Zählreihe verfügen, was Studien zur Schnelligkeit und Genauigkeit von Paritätsurteilen zeigten (vgl. Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993). Von den Gegebenheiten des post counting-Subitizing kann also nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse beim pre counting-Subitizing geschlossen werden, was dieser Unterscheidung durch Davis und Pérusse (1988) besonderes Gewicht verleiht. Bei größeren Numerositäten wird die Aufmerksamkeit auf die Kollektionseigenschaft gelenkt, bei kleinen oder sehr kleinen Numerositäten auf die Eigenschaften einzelner Objekte. Ein Grenzfall liegt vor, wenn der größte Teil der Elemente einer Kollektion homogen angeordnet ist, z.B. linksdiagonal orientierte Striche, in die anders orientierte Striche, z.B. rechtsdiagonal orientierte, eingebettet sind. Die größere Kollektion wird als “Hintergrund” interpretiert und die wenigen, differenten Elemente springen in den Vordergrund (“pop out - Phänomen”, z.B. Nothdurft, 1985; Rieth & Sireteanu, 1994; Sireteanu, 2000). Bei Säuglingen erscheint die Vorstellung angemessen, dass die Numerosität als Eigenschaft einer kleinen Gruppe von Objekten wahrgenommen wird. Sie nehmen ‘Einheit’, ‘Zweiheit’ und ‘Dreiheit’ als Objekteigenschaft wahr. Diese Einheit von Objektindividuiierung und Anzahlwahrnehmung ist eine

Resultante der visuellen Informationsverarbeitung und unabhängig von Sprache und Zählen. Diese Kompetenz kann als Bestandteil der Objektwahrnehmung und als Aspekt der numerischen Identität verstanden werden, beruhend auf der Identität und der Nicht-Identität von Objekten.

4. 4. 2 Diskrimination auditiver Numerositäten

4. 4. 2. 1 Experiment 6

Die Experimente 4 und 5 beziehen sich auf das visuelle System und die visuelle Objektwahrnehmung. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Interpretationen auf andere Modalitäten soll in den folgenden Experimenten überprüft werden. In der visuellen Modalität lassen sich Ereignisse als Veränderungen von Objekteigenschaften verstehen. Die Dauer der Veränderung muss sehr kurz und die Übergänge müssen abrupt sein, um als "Ereignis" wahrgenommen zu werden. Ein Objekt kann z.B. Art oder Richtung seiner Bewegung abrupt verändern. Eine periodische Bewegungsrichtungsänderung kann besonders gut gezählt werden, beispielsweise die Hin- und Herbewegung eines schwingenden Pendels. Die Realisierung solcher Ereignisse ist im Gegensatz zu einer statisch präsentierten Objektmenge zeitlich sequentiell. Zwar ist auch das Zählen sequentiell, aber beim Abzählen einer statischen, räumlichen Objektmenge kann nachgeprüft werden, welche Objekte schon gezählt wurden, fehlerhafte Zählungen können korrigiert oder die gezählten Objekte können räumlich separiert werden. Des Weiteren kann das Abzählen einer Objektmenge mit einer in gewissen Grenzen frei wählbaren Geschwindigkeit vorgenommen werden, wohingegen es das Abzählen von Ereignissen erfordert, sich deren Geschwindigkeit anzupassen. Das Enumerieren von sequentiellen Ereignissen ist also zeitabhängig und setzt die Wahrnehmung von Dauer sowie von Anfangs- und Endsignalen voraus, ohne die ein Ereignis nicht individuiert werden kann. Aufgrund der Ähnlichkeit der Mechanismen kann man erwarten, dass eine kleine Anzahl von Ereignissen genauso enumeriert werden kann wie eine kleine Anzahl von Objekten. Wynn (1995) konnte zeigen, dass im Mittel 6 Monate alte Säuglinge kleine, ereignisartige Numerositäten ähnlich gut diskriminieren wie kleine, objektartige Numerositäten. Die Ereignisse wurden visuell präsentiert, indem die Säuglinge an eine entweder zweimal oder dreimal kurz hüpfende Puppe habituieret wurden. Nach einer bestimmten Anzahl von Ereignissen stand die Puppe still und die Fixationszeit wurde gemessen. Wenn das Baby habituieret war, wurde in der Testphase die habituierete Hüpfsequenz abwechselnd mit einer neuen Hüpfsequenz präsentiert. Es zeigte sich eine bedeutsame Dishabituierung bei den neuen Ereignissen. Wynn führte diesen Versuch auch mit bewegten Puppen durch, die während einer kontinuierlichen Bewegung zweimal oder dreimal mit dem Kopf wackelten. Die Befunde waren mit denjenigen der Hüpfbedingung vergleichbar.

Säuglinge erfassen jedoch nicht nur kleine Numerositäten visueller, sondern auch akustischer Ereignisse. Der Nachweis erfolgte im Rahmen eines intermodalen Mächtigkeitsabgleiches ('intermodal matching') von gehörten Tönen und gesehenen Objekten. Starkey, Spelke, und Gelman (1990) untersuchten Säuglinge, die im Mittel 7 Monate alt waren, und führten mit ihnen Experimente durch, welche auf einer kreuzmodalen, audio-visuellen Blickpräferenztechnik basierten. Sie präsentierten den Säuglingen nebeneinander platziert zwei Fotografien mit je 2 oder 3 Objekten, wie sie im Haushalt vorkommen. Eine Sekunde nach Darbietungsbeginn der Objekte hörten die Säuglinge entweder 2

oder 3 Töne mit einer Frequenz von 1.3 Schlägen pro Sekunde, die durch Schlagen auf eine Blechdose erzeugt wurden, welche zwischen den Fotografien platziert war. Danach blieben die beiden Numerositäten 10 Sekunden sichtbar, innerhalb dieser tonlosen Periode wurde die Fixationsdauer gemessen. Das Experiment wurde nach der Tonanzahl in zwei Blöcke zu je 16 Durchgängen unterteilt.

Starkey et al. (1990) fanden eine schwache, aber bedeutsame Blickpräferenz für dasjenige Display, das mit der Anzahl der präsentierten Töne übereinstimmte, allerdings nur im zweiten Präsentationsblock. Diese Blickpräferenz war auch festzustellen, wenn die Anzahl der Töne alle 8 Durchgänge wechselte, bedeutsam wurde sie nur, wenn beide Blöcke aggregiert wurden (54% bei einem Zufallsniveau von 50%). In einem weiteren Experiment wurde zeitliche und numerische Information dadurch dissoziiert, dass die Dauer von 2 Trommelschlägen derjenigen von 3 angeglichen wurde. Auch in diesem Experiment zeigte sich nur im Falle der Aggregation über die Blöcke ein schwacher, aber signifikanter Korrespondenzeffekt. Bei der Aggregation der Daten über alle drei audio-visuellen Blickpräferenzexperimente zeigte sich, dass die insgesamt gefundene Präferenz v.a. auf die erhöhte Präferenz im zweiten Block zurückzuführen war. In einem letzten Experiment prüften Starkey et al., ob Säuglinge auch in der Lage sind, numerische Korrespondenzen zwischen nicht simultan präsentierten Objekten und Tönen zu entdecken. Daher war dieses Experiment in drei Phasen unterteilt: In der ersten Phase maßen sie die Präferenz für 2 und 3 Töne, wobei je drei Sequenzen aus 2 bzw. 3 Tönen bestanden. Die Töne wurden abgespielt, nachdem auf einem Rückprojektionsschirm eine schwarze Scheibe erschienen war. Nachdem die Sequenz verklungen war, wurde die Fixationsdauer auf diese Scheibe gemessen, wobei die Säuglinge mindestens 1 Sekunde auf die Scheibe sehen und darauffolgend 2 Sekunden wegblicken mussten, um den nächsten Durchgang zu starten. In dieser Vortestphase zeigte sich keine Präferenz für eine Tonanzahl. Danach folgte eine Familiarisierungsphase, in der den Säuglingen entweder 2 oder 3 Objekte der genannten Art präsentiert wurden, bis sie an diese habituiert waren, d.h. 50% der Blickdauer aus den ersten drei Durchgängen erreicht oder unterschritten worden war. In der Testphase hörten die Säuglinge wieder die Tonsequenzen aus der Präferenzphase. Die Säuglinge sahen länger auf die schwarze Scheibe, wenn Tonsequenzen gespielt wurden, die mit der Anzahl der visuellen Objekte übereinstimmten, als wenn diese nicht übereinstimmten. Allerdings trat dies nur auf, wenn die korrespondierende Tonanzahlsequenz im ersten Testdurchgang präsentiert wurde. Wurde die nonkorrespondierende Tonanzahlsequenz im ersten Testdurchgang präsentiert, trat keine Blickfixationspräferenz auf.

Starkey et al. interpretieren ihre kreuzmodalen Experimente dahingehend, dass Säuglinge intermodale numerische Übereinstimmungen sowohl simultan als auch sukzessive entdecken können. Diese Korrespondenz soll durch einen Mechanismus entdeckt werden, der in der Anwendung der Eins-zu-Eins-Korrespondenz besteht. Starkey et al. führten aber auch ein intramodales Habituationsexperiment analog zu Experiment 4 durch. Auch sie fanden eine Präferenz für die nicht-korrespondierende Numerosität. Allerdings finden Starkey et al. dafür keine zufriedenstellende Erklärung. Moore, Benenson, Reznick, Peterson & Kagan (1987) konnten die Befunde der Studie von Starkey et al. (1983) nicht replizieren: sie fanden keine intermodale Korrespondenzpräferenz. Starkey et al. (1990) versuchen durch eine Reanalyse der Vorgehensweise und Daten von Moore et al. (1987) zu zeigen, dass diese eine Neuigkeitspräferenz statt eine Familiaritätspräferenz induzierten. Einen intermodalen Numerositätsabgleich fanden Starkey et al. (1990) bei der Reanalyse der Daten von

Moore et al., indem sie von Moore et al. aus der Analyse ausgeschlossene Kinder wieder in die Analyse aufnahmen. Diese Kinder waren ausgeschlossen worden, weil sie nicht auf beide Darstellungen geblickt hatten. Bei der Reanalyse finden sie dann den Beleg für den intermodalen Abgleich. Letztlich schließen Starkey et al. (1990) aber mit der Feststellung: “In conclusion, research on cross-modal phenomena in infants has begun only recently, and little is known about the factors that lead to a particular pattern of preferences when cross-modal preference procedures are used” (S.123). Zu den Mechanismen der intermodalen Mengenkorrespondenzprüfung meinen sie nur: “Infants can detect intermodal numerical correspondences by virtue of mechanisms that operate separately on audible events and on visible scenes” (S.123).

Folgende Aspekte heben sie als allgemeinere Erkenntnis hervor: Säuglinge entdecken nicht nur Relationen zwischen einzelnen Entitäten, sondern auch zwischen Mengen von Entitäten. Schon auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau verfügen Säuglinge anscheinend über die Äquivalenz bzw. Non-Äquivalenzrelation. Numerische Kompetenzen entwickeln sich wohl nicht ausschließlich über das Entdecken visueller Numerositäten. Auch in der auditiven Modalität müssen diskrete Entitäten repräsentiert und zu einer Menge zusammengefasst werden. Daher müssten Säuglinge über die Eins-zu-Eins-Korrespondenz, mindestens aber über eine Art numerischer Computation verfügen. Sie ist auf der Ebene diskreter Repräsentationen wirksam und erlaubt auch eine ein-eindeutige Verpaarung von Objekten und Tönen. Starkey et al. (1990) verweisen auf das Numeron-Modell, demzufolge die amodalen Numerons das passende Korrespondenzfeststellungsmedium sein könnten.

Mix, Levine, & Huttenlocher (1997) kritisierten die häufig als Beleg für abstrakte numerische Kompetenzen im Säuglingsalter zitierte Arbeit von Starkey et al. (1990). Sie sind der Auffassung, dass Säuglinge Numerositäten nicht in unterschiedlichen Modalitäten repräsentieren können und daher über die Eins-zu-Eins-Korrespondenzprüfung deren Äquivalenz oder Nicht-Äquivalenz feststellen. Die Experimente, die Mix et al. (1997) bei im Mittel 7 Monate alten Säuglingen durchführten, glichen denjenigen von Starkey et al. (1990), mit zwei Änderungen: Zunächst hielten sie die Dauer der Töne konstant und variierten nur deren Anzahl. Sie fanden, dass die Säuglinge die nichtäquivalenten visuellen Darbietungen präferierten. Wurde die Rate und Dauer der Tonsequenzen nicht geblockt, sondern bei jedem Säugling randomisiert präsentiert, gab es keinerlei bedeutsame Blickpräferenzen mehr.

Kennzeichnend ist für diese, auf die Prüfung intermodaler Korrespondenzen angelegten Studien, dass sie keine Konzeption entwickeln, wie Säuglinge einzelne Töne diskriminieren, repräsentieren und zu einer Numerositätssequenz integrieren. Mix et al. (1997) erklären die Tatsache, dass sie keine intermodalen Korrespondenzen bei 7 Monate alten Säuglingen fanden, u.a. folgendermaßen: “Perhaps infants have difficulty performing temporal integration over the sound sequences to group them into sets that can be evaluated numerically. Alternatively, infants may find sounds more difficult to individuate than items in a visual display. Because within mode auditory tasks have not been used to assess infants’ numerical discrimination, little is known about their ability to represent the numerosity of auditory sequences” (S.428).

Allerdings konnte im Bereich der auditiven Modalität gezeigt werden, dass die Numerosität als diskriminativer Stimulus fungieren kann. Bijeljac-Babic, Bertoni und Mehler (1993) führten Experimente mit 4 Tagen alten Babys mit der high-amplitude sucking-Methode (HAS) durch. Sie präsentierten den Babys zwei große Mengen phonetisch variierender “Wörter”, die entweder aus 2 oder 3 Konsonant-Vokal-Silben bestanden. Sie fanden, dass Babys diese “Wörter” aufgrund der

Anzahl der Silben unterschieden, auch dann, wenn wie in einem zweiten Experiment geschehen, die Dauer der Silben variiert wurde. Allerdings konnten die Babys in einem dritten Experiment 4 nicht von 6 Silben unterscheiden. Diese Befunde stimmen mit denen aus Studien zur Unterscheidung von Numerositäten im visuellen Bereich überein.

Im folgenden Experiment soll die Frage geklärt werden, ob ältere Babys mit einem mittleren Alter von 7 Monaten vergleichbare Diskriminationsleistungen im auditiven Bereich erbringen. Dabei werden nichtsprachliche Tonsequenzen und eine operante Verfahrensweise, die conditioned head-turn technique, verwendet. Überprüft werden soll, ob Säuglinge in der auditiven Modalität kleine Gruppen einzelner Schallereignisse so repräsentieren, dass sie größere und kleinere Numerositäten unterscheiden können. Die operante Konditionierung des Kopfdrehens eines Säuglings auf bestimmte Schallereignisse hin geschieht durch visuelle Verstärker, z.B. eine sich lebhaft bewegende, bunte Puppe. Das Konditionieren des Kopfdrehens wurde vor allem wegen technisch bedingter Grenzen als "single-interval, go / no go detection task" (G/NG-D) durchgeführt. Es wurden Tonsequenzen als paarweise Diskriminanda vorgespielt, die aus 2vs3, 4vs6 und 4vs8 stets gleichklingenden, pro Versuch gleichlangen, gleichlauten Tönen bestanden und deren Rate (Töne pro Zeit) so variiert wurde, dass drei Sequenzen kurzer, mittlerer und langer Dauer entstanden. Da in den visuellen Numerositätsdiskriminationsexperimenten mit gleichartigen Objekten gearbeitet wurde, sollten die einzelnen Töne gleichlange sein. Unterschiedliche sequentielle Tonanzahlen gleicher Dauern wiesen also unterschiedliche Raten, unterschiedliche sequentielle Tonanzahlen gleicher Rate also unterschiedliche Dauern auf. Die damit unvermeidliche Kovariation zwischen sequentieller Tonanzahl und Rate oder Dauer sollte durch die Randomisierung unterschiedlicher sequentieller Tonanzahlen unterschiedlicher Raten oder Dauern neutralisiert werden. Hinzu kommt, dass die Go-/No-Go-Aufgabe die Generalisierbarkeit über Rate und Dauer sequentieller Tonanzahlenunterschiede prüfte, die während der Trainingsphase konstant gehalten wurden. Da die Anzahl der Kopfdrehungen zur Schallquelle hin sowohl bei der verstärkten als auch bei der unverstärkten Sequenz registriert wird, lassen sich über beide relative Häufigkeiten die Treffer, der falsche Alarm und d' als Diskriminationsindex bestimmen.

Stichprobe

Es wurden 20 Babys mit einem mittleren Alter von 222,1 Tagen ($SD=16,1$) untersucht, davon 10 weiblichen und 10 männlichen Geschlechtes. 2 weitere männliche Babys mussten wegen schlechten Befindens von der Analyse ausgeschlossen werden. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegepersonen ein Geburtsgewicht von über 2900 g und ein Gestationsalter, das zwischen 38 und 41 Wochen bei der Geburt war. Die Eltern wurden in Kleinkindgruppen gewonnen, meldeten sich aufgrund von Aushängen bei Kinderärzten oder wurden durch Mundpropaganda angeworben.

Stimuli

Mit Hilfe eines Synthesizerprogrammes (AcidWave1.3) wurden gleichklingende Töne hergestellt. Die fundamentale Frequenz betrug 700 Hz, der Schalldruck am Kopf der Babys betrug 62 dB SPA, die Dauer eines Tons war 200msec. Aus diesen Tönen wurden Tonsequenzen mit den Numerositäten 2 und 3 hergestellt. Durch die Variation der Intervalle zwischen den Tönen (Inter-Ton-Intervalle, ITI) wurde die Dauer der Tonsequenzen variiert (vgl. Tabelle 4-11). Die Variation der Rate

wurde so vorgenommen, dass es drei unterschiedliche Dauern (kurz, mittel, lang) und damit drei unterschiedliche Raten (ITI_1= 100msec, ITI_2=200msec, ITI_3=400msec) pro Numerosität gab. Die Tonsequenzen wurden ebenfalls mit Hilfe des Synthesizers hergestellt.

Tabelle 4-11. Numerosität, Inter-tonintervalle und Gesamtdauern der Tonsequenzen

Numerosität	Inter-tonintervall (msec)	Gesamtdauer (msec)	Tonsequenz
2	100	500	2k
2	200	600	2m
2	400	800	2l
3	100	800	3k
3	200	1000	3m
3	400	1400	3l

Über einen Laptop wurden über zwei nebeneinanderstehende Lautsprecher die Tonsequenzen abgespielt. Das Intervall zwischen zwei Tonsequenzen betrug 4 Sekunden.

Verfahren und Versuchsablauf

Es wurde die conditioned head-turn technique als “single-interval, go/no go detection task (G/NG-D)” realisiert: die Kopfdrehbewegung des Babys in Richtung der Schallquelle bei Präsentation der Numerosität 3 wurde mit einem visuellen Reiz verstärkt.

Der Versuch fand in einem schallarmen, mit mattweißen Tapeten versehenen Labor statt (Größe 2,6m x 4,5m), das mit einer Schallschutzdecke und Teppichboden sowie einem schalldichten Fenster versehen war (vgl. Exp. 4 und 5). Die Umgebungsleuchtstärke betrug 500lux am Platz des Babys. Das Baby saß auf dem Schoß der Pflegeperson, die auf einem Stuhl in rechtem Winkel zur Bühne des Kasperltheaters saß, bei Frontalsicht auf die Bühne an deren linken Ecke (Entfernung Kopf des Babys - Bühne: 70 cm. Der Prospekt (110 cm breit, 65 cm tief und 50 cm hoch) befand sich auf einem Gerüst, 98 cm oberhalb des Bodens. Das Gerüst der Bühne war mit beige Veloursstoff verkleidet, und der Bühnenraum durch zwei Vorhanghälften aus gleichem Stoff verdeckt. Hinter den Vorhängen waren an der linken Seite auf Höhe des Kopfes des Babys zwei kleine Lautsprecher (Sinus LS302) platziert. Hinter den Lautsprechern befand sich ein Beobachtungsmonitor, auf dem der VI das Baby beobachten konnte. Die aufnehmende Fingerkamera befand sich in der Mitte unter der Bühne auf einem Dreifuß. Ihr Objektiv war durch einen für das Baby nicht zu sehenden kleinen Schlitz der Verkleidung auf den Oberkörper und den Kopf des Babys gerichtet. Der Versuchsleiter saß auf der rechten Seite hinter der Bühne, vor sich den Laptop, und präsentierte über die Cursor-tasten die Tonsequenzen. Auf seiner rechten Hand befand sich eine Handpuppe, ein Kasperl mit einem bunten Gewand, der deutlich lachende Gesichtszüge und eine rote Nase hatte. Im Blickfeld des VI befanden sich sowohl der Laptop- als auch der Beobachtungsmonitor. Wenn der VI sah, dass das Baby seinen Kopf kontingent zum Abspielen der größeren Tonnumerosität in Richtung Bühne bewegte, dann hielt er die Handpuppe durch die Bühnenvorhänge, so dass das Baby bei einer Kopfbewegung von ca. 30° in Richtung Bühne in einer Entfernung von ca. 70 cm, für ca. 4 s die sich bewegende Puppe sah. Als Reaktionslatenz wurden dem Baby 1-3 Sekunden eingeräumt, danach

wurde entweder die nächste Tonsequenz oder die Verstärkerpräsentation gestartet. Vor dem Baby stand ein quadratischer Tisch, an dessen, dem Baby gegenüberliegenden Seite eine Versuchsassistentin saß, die während des Versuches das Baby mit einem "stillen" Spielzeug, einem mit farbigen Mustern bedruckten Stoffwürfel, davon abhielt, ständig in Richtung der Bühne zu schauen, ohne die Aufmerksamkeit des Babys zu stark zu fesseln. Falls das Baby zu lange in Richtung Bühne schaute oder dauerhaft in eine andere Richtung blickte, wurde der Würfel etwas auffälliger bewegt oder in extremeren Fällen das Baby einmalig beim Namen gerufen. Sowohl die Mutter als auch die assistierende Person trugen während des Versuches einen Kopfhörer und hörten Musik, um die Identifizierbarkeit der Tonsequenzen zu erschweren. Bühne, Mutter und Kind sowie der Tisch wurden von einer Deckenkamera aufgenommen. Sowohl die Bildsignale der Fingerkamera als auch diejenigen der Deckenkamera wurden in einen anderen Raum übertragen und dort mit zwei separaten Videorecordern aufgenommen und mit Timecode (VITC) versehen, so dass der Versuch off-line ausgewertet werden konnte. Die Person, die in einem anderen Raum diese Aufnahmen überwachte, registrierte on-line das Kopfdrehen des Babys, indem sie auf einer Liste hinter den Abkürzungen für die jeweiligen Tonsequenzen eines Durchgangs eine Markierung machte, falls das Baby den Kopf Richtung Bühne drehte.

Der Versuch bestand aus einer Trainings- und einer Testphase. In der Trainingsphase wurden immer mittellange Ton-Numerositäten präsentiert, also die Tonsequenzen 2m und 3m (vgl. Tab. 4-11). Das Baby wurde nur verstärkt, wenn es während des Abspielens der Ton-Numerosität 3m mit einer maximalen Latenz von 3 Sekunden den Kopf aus der Mittellinie mindestens 45° hin zur Bühne drehte. Der Kaspar wurde für 4 Sekunden gezeigt. Wenn das Baby anfangs auf die 3m-Töne hin nicht den Kopf drehte, wurden die Töne wiederholt und nochmals der Kaspar präsentiert, bis das Baby auf die 3m-Töne hin den Kopf zur Bühne drehte. Nach 4 erfolgreichen 3m-Durchgängen in Folge wurde 4mal die 2m-Sequenz in Folge präsentiert. Dann wurde 6mal abwechselnd die 2m- und die 3m-Sequenz dargeboten. Kriterium war, dass die Babys mindestens zweimal in Folge auf den verstärkten Reiz, aber nicht auf den unverstärkten Reiz reagierten, also eine Doppelsequenz erfolgreich absolvierten. Es wurden maximal 20 Trainingsdurchgänge präsentiert, da ansonsten die Gefahr bestand, dass die Säuglinge das Interesse an der folgenden Testphase verlieren, wie Vorversuche zeigten.

In der Testphase wurden die Tonsequenzen nach dem gleichen Schema präsentiert. Jede der drei 2er- und drei 3er- Sequenzen wurde zehnmal präsentiert, so dass die Testphase aus 60 Präsentationen bestand. Die Abfolge war so geregelt, dass nicht mehr als zwei Tonsequenzen gleicher Numerosität nacheinander auftreten durften. Auf diese Weise wurde verhindert, dass die Säuglinge eine regelmäßige Abfolge antizipieren konnten und es wurde erreicht, dass die meisten sequentiellen Paare unterschiedlicher Numerosität waren. Außerdem wurde Sorge getragen, dass die beiden Tonsequenzen gleicher Dauer, also 2l und 3k fünfmal in zufälliger Abfolge nacheinander vorkamen; ansonsten waren die Abfolgen zufällig. Jedem Säugling wurde eine andere Abfolge dargeboten.

Eine Beobachterin registrierte online am Bildschirm mit Hilfe einer Tabelle, in der die Abfolge der Numerositäten eingetragen war, ob der Säugling den Kopf zur Bühne drehte, wenn die Tonsequenz abgespielt wurde. Es konnte anschließend ausgezählt werden, wie oft der Säugling bei 2er- beziehungsweise bei 3er-Sequenzen zur Bühne schaute. Bei 6 zufällig ausgewählten Säuglingen wurden die Videoaufnahmen des Kopfes durch eine naive Beobachterin (blind hinsichtlich Bedingung

und Verstärkung) ausgewertet. Es ergab sich eine Übereinstimmung zu den Urteilen der Person, die online auswertete, die im Mittel bei 93% (SD: 2%) lag.

Ergebnisse

Das Kriterium, mindestens zweimal in Folge auf die verstärkte 3m-Sequenz und zweimal nicht auf die 2m-Sequenz zu blicken, erfüllten 17 von 20 Säuglingen. Angelehnt an Thorpe, Trehub, Morrongiello und Bull (1988) sowie an die methodischen Überlegungen von Macmillan und Kaplan (1985), zur Güte der Berechnung von d' aus gemittelten relativen Häufigkeiten, wurde d' berechnet. Im Mittel blickten die Säuglinge bei der Präsentation der unverstärkten 2er Sequenzen 12.4mal zur Schallquelle auf der Bühne (SD=5.8) und bei Präsentation der verstärkten 3er-Sequenzen 16.85 mal (SD=5.03). Dieser Unterschied wird von einem t -Test für gepaarte Stichproben als hoch signifikant indiziert ($t(19)=-5.368$, $p=.000$, 2-seitig). Der falsche Alarm liegt im Mittel bei 41% (SD = 19%) und ist damit relativ hoch. Das mittlere d' beträgt 0.444 (SD = 0.378) und ist signifikant von 0 verschieden ($t(19) = 5.254$, $p=.000$, 2-seitig). Das Kriterium beta ist im Mittel 1.12 (SD = 0.394) nicht bedeutsam von 1 verschieden ($t(19)=1.36$, $p=.19$, 2-seitig).

Diskussion des Experimentes 6

Das Ergebnis von Experiment 6 zeigt, dass die Säuglinge auch in der auditiven Modalität 2 von 3 Tönen unterscheiden können. Da die unterschiedlichen Dauern, Raten und Numerositäten unsystematisch dargeboten wurden, kann geschlossen werden, dass die Säuglinge die Tonanzahl einzelner Sequenzen und nicht deren Dauer oder Rate zur Diskrimination nutzen. Wie auch sonst in diesem Forschungskontext ist d' zwar bedeutsam von Null verschieden, aber klein. Die relativ große Anzahl falsch positiver Reaktionen dürfte auch damit zusammenhängen, dass diese Diskriminationsaufgabe sehr große Anforderungen stellt, da die Babys bei der Präsentation des nicht verstärkten Reizes ihre Reaktionsbereitschaft unterdrücken müssen. Hinzu kommt, dass nicht sofort auf den ersten Ton reagiert werden darf, sondern alle Töne abgewartet werden müssen, um richtig reagieren zu können. Daher ist diese Go-/No-Go Diskriminationsaufgabe schwerer als eine 2-AFC-L-Aufgabe ("single-interval, two-alternative, forced-choice localization task") und unterschätzt folglich die "wahre Kompetenz" der Säuglinge. Die Resultate dieses Experimentes entsprechen den von Starkey et al. (1990) gefundenen Ergebnissen und erhöhen deren Plausibilität, wobei die Tonsequenzen im hier berichteten Experiment 6 deutlich kürzer waren und auch deutlich schneller präsentiert wurden. In guter Übereinstimmung steht dieser Befund mit den Resultaten, die Bijeljac-Babic, Bertoncini und Mehler (1993) mit 2-Konsonant-Vokal- versus 3-Konsonant-Vokal-Silben bei wenigen Wochen alten Säuglingen fanden.

4. 4. 2. 2 Experiment 7

Es kann angenommen werden, dass Säuglinge einzelne Schallereignisse individuieren, zu einer Sequenz zusammenfassen und diese als anzahlmäßige Ganzheit repräsentieren können. Daran schließt sich die Frage an, ob es im auditiven Bereich ähnliche Regelmäßigkeiten gibt wie im Falle des visuellen Subitizing, z.B. ob die Säuglinge ebenfalls nicht in der Lage sind, 4 und 6 Töne zu unterscheiden, die also denselben Weber-Bruch wie 2 und 3 aufweisen. In einem weiteren Experiment sollte dies geklärt werden.

Stichprobe

Es wurden 20 Babys mit einem mittleren Alter von 210,1 Tagen ($SD=12,3$) untersucht, davon 13 weiblichen und 7 männlichen Geschlechtes. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegepersonen ein Geburtsgewicht über 2900 g und ein Gestationsalter, das zwischen 38 und 41 Wochen bei der Geburt war. Die Eltern wurden in Kleinkindgruppen, durch Aushänge bei Kinderärzten oder durch Mundpropaganda angeworben.

Stimuli

Mit Hilfe eines Synthesizers wurden Töne hergestellt (vgl. Experiment 6). Die fundamentale Frequenz betrug 700 Hz, der Schalldruck 62 dB SPA, die Dauer eines Tones war 200msec. Aus Tab. 4-12 wird ersichtlich, welche Numerositäten, mit welchen Inter-Ton-Intervallen, zu welchen Sequenzen und welchen Dauern realisiert wurden.

Tabelle 4-12. Numerosität, Intertonintervalle und Gesamtdauern der Tonsequenzen

Numerosität	Intertonintervall (msec)	Gesamtdauer (msec)	Tonsequenz
4	100	1100	4k
4	200	1400	4m
4	300	1700	4l
6	100	1700	6k
6	200	2200	6m
6	300	2700	6l

Verfahren und Versuchsablauf

Die Realisation geschah analog zu Experiment 6. In zufälliger Abfolge wurden fünfmal 4l und 6k aufeinanderfolgend präsentiert, wobei die 4er Numerosität visuell verstärkt wurde. Das Kriterium für ein erfolgreiches Training war, dass die Säuglinge mindestens zwei Doppel-Sequenzen lang auf die 4er-Sequenzen, aber nicht auf die 6er Sequenzen reagierten.

Ergebnisse

Nur 7 Kinder erreichten das Trainingskriterium. Im Mittel blickten die Säuglinge bei der Präsentation der unverstärkten 6er Sequenzen 15.35mal zur Schallquelle auf der Bühne ($SD=4.51$) und bei Präsentation der verstärkten 4er Sequenzen 16.3mal ($SD=4.26$). Dieser Unterschied wird von einem t-Test für gepaarte Stichproben als non-signifikant indiziert ($t(19) = .932$, $p = .363$, 2-seitig). Der falsche Alarm liegt im Mittel bei 51% ($SD=15\%$) und ist damit sehr hoch. Das mittlere d' beträgt 0.089 ($SD=0.403$) und ist nicht signifikant von 0 verschieden ($t(19) = .990$, $p = .335$, 2-seitig). Das Kriterium beta ist im Mittel 1.004 ($SD=0.125$) und nicht bedeutsam von 1 verschieden ($t(19) = .141$, $p = .89$, 2-seitig).

Diskussion

Die Säuglinge können 4er- von 6er-Tonsequenzen mit unterschiedlichen Raten und Dauern nicht voneinander unterscheiden. Dies ist zum einen am d' festzustellen und zum anderen daran, dass

die meisten Kinder unter den realisierten Trainingsbedingungen 4 nicht als diskriminativen Stimulus nutzten. Das bedeutet, dass auch in der auditiven Modalität das Weber-Fechner Gesetz für kleinere Numerositäten nicht gilt: Säuglinge können zwar 2er- von 3er-Tonsequenzen unterscheiden, aber nicht 4er- von 6er-Tonsequenzen.

Dieser Befund entspricht dem aus dem Bereich der visuellen Modalität (vgl. Experiment 4). Sowohl die simultane Darbietung einer kleinen, aus zweidimensionalen Objekten bestehenden Numerosität als auch die sequentielle Präsentation einer kleinen, aus gleichartigen Schallereignissen bestehenden Numerosität führen zu vergleichbaren Diskriminationsleistungen bei durchschnittlich 7 Monate alten Säuglingen.

4. 4. 2. 3 Experiment 8

Das Ergebnis des Experimentes 7 ließe sich auch dadurch erklären, dass bei längerdauernden Tonsequenzen der Eindruck einer "Einheit" durch die zeitliche Erstreckung verloren geht, d.h. dass die Integrationsmöglichkeiten des Arbeitsgedächtnisses nicht ausreichen. Aus diesem Grunde wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, in dem die Dauer der Tonsequenzen dadurch verringert werden sollte, dass sowohl die Dauer der einzelnen Töne als auch der Intertonintervalle verkürzt wurde. Die 6er Tonsequenzen sollten unterhalb der längsten Dauer der 4er - Sequenzen aus Experiment 7 liegen (vgl. Tab. 4-12). Dadurch, dass die Durchführung des Experimentes ansonsten völlig analog zu Experiment 6 und 7 ablief, wurde es außerdem möglich, den Einfluss der Gesamtdauer bei der Diskrimination der 4er und 6er Sequenzen zu prüfen. Sollten zeitlich kürzere Tonsequenzen besser zeitlich zu einer Gruppe integriert werden können, so könnte sich das förderlich auf die Diskrimination von 4er- und 6er- Sequenzen auswirken.

Stichprobe

Es wurden 21 Babys mit einem mittleren Alter von 213,0 Tagen ($SD=20,5$) untersucht, davon 11 weiblichen und 10 männlichen Geschlechtes. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegepersonen ein Geburtsgewicht über 2900 g und ein Gestationsalter, das zwischen 38 und 41 Wochen bei der Geburt war. Die Eltern wurden in unterschiedlichen Kleinkindgruppen, über Aushänge bei Kinderärzten oder wurden von anderen Teilnehmern angeworben.

Stimuli

Mit Hilfe eines Synthesizers wurden Töne mit einer Dauer von 70 msec hergestellt. Die fundamentale Frequenz betrug 700 Hz, der Schalldruck 62 dB SPA. Aus Tab. 4-13 wird ersichtlich, welche Numerositäten mit welchen Inter-Ton-Intervallen, zu welchen Sequenzen und welchen Dauern realisiert wurden.

Tabelle 4-13. Numerosität, Intertonintervalle und Gesamtdauern der Tonsequenzen

Numerosität	Intertonintervall (msec)	Gesamtdauer (msec)	Tonsequenz
4	73.33	500	4k
4	106.66	600	4m
4	173.33	800	4l
6	76	800	6k
6	116	1000	6m
6	196	1400	6l

Verfahren und Versuchsablauf

Die Realisation geschah analog zu Experiment 7, aber anders als in diesem hatten die 4er- und 6er-Sequenzen kürzere Dauern und höhere Raten (vgl. Tab. 4-12, 4-13). Wiederum wurden die 4er-Numerositäten visuell verstärkt und es folgten in zufälliger Abfolge 4l und 6k fünfmal aufeinander. Eine zufällig gezogene Teilmenge von 6 Säuglingen wurde von einer naiven Beobachterin off-line ausgewertet, wobei keine Toninformation genutzt werden konnte und es ergab sich eine Übereinstimmung zu den Urteilen der Person, die online auswertete, die im Mittel bei 90,2% (SD: 2,8%) lag.

Ergebnisse

Von den 20 Kindern erfüllten nur 5 das Trainingskriterium. Im Mittel blickten die Säuglinge bei der Präsentation der unverstärkten 6er-Sequenzen 16.57mal zur Schallquelle auf der Bühne (SD=4.27) und bei Präsentation der verstärkten 4er-Sequenzen 15.95mal (SD=4.34). Dieser Unterschied wird von einem t-Test für gepaarte Stichproben als non-signifikant indiziert ($t(20) = -1.033$, $p = .314$, 2-seitig). Der falsche Alarm liegt im Mittel bei 55% (SD=14%). Das mittlere d' beträgt -0.075 (SD=0.297) und ist nicht signifikant von 0 verschieden ($t(20) = -1.16$, $p = .26$, 2-seitig). Das Kriterium Beta ist im Mittel 1.03 (SD=0.111) und nicht bedeutsam von 1 verschieden ($t(20) = .915$, $p = .37$, 2-seitig).

Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit dem dreifach gestuften Faktor Diskriminationsbedingung (2vs3, 4vs6, 4kvs6k) und mit d' als Maß gerechnet, wobei sich ein hochsignifikanter Effekt der Diskriminationsbedingung ergab ($F(2;58) = 10.98$, $p = .000$). A priori Kontraste ergaben zwischen 2vs3 und 4vs6 einen signifikanten Unterschied ($t(58) = 3.11$, $p = .003$, 2-seitig) im d' Wert, wohingegen sich 4vs6 und 4kvs6k nicht bedeutsam unterschieden ($t(58) = 1.46$, $p = .15$, 2-seitig).

Diskussion

Die Ergebnisse des Experiments 8 bestätigen diejenigen des Experimentes 7: Säuglinge mit einem mittleren Alter von 7 Monaten können 4er-Tonsequenzen von 6er-Tonsequenzen nicht diskriminieren. Dies trifft zu, obwohl die Dauer der Sequenzen in Experiment 8 um ca. 50% gegenüber Experiment 7 verringert wurde. Damit konnten auch keine Evidenzen für die Vermutung gewonnen werden, dass eine kürzere Ereignissequenz die temporale Integration der Sequenzen begünstigt und die Diskrimination der Sequenzen erleichtert. Die d' -Werte der Experimente 7 und 8 unterscheiden sich statistisch nicht, was die Vermutung stützt, dass die zeitlichen Unterschiede der Sequenzen nur wenig

zur Diskriminierbarkeit der Tonsequenzen beitragen, sondern dass diese überwiegend von der Numerosität der Tonsequenzen beeinflusst wurde. Die Präsentation kleiner Numerositäten in der auditiven Modalität führt zu ähnlichen Befunden wie in der visuellen. Wie schon im Experiment 7 gefunden, lässt sich die Unterscheidbarkeit von kürzeren 4er- und 6er-Tonsequenzen mit höherer Rate auch im Verlaufe von ca. 75 Durchgängen nicht trainieren.

4. 4. 2. 4 Experiment 9

Für größere Numerositäten im Bereich der visuellen Modalität wurde ein Weber-Bruch von 50% ermittelt (Xu & Spelke, 2000), dessen Übertragbarkeit auf die auditive Modalität im folgenden Experiment überprüft werden soll. Allerdings ist es problematisch, größere Numerositäten auditiv zu präsentieren, da diese dann sehr lange werden und die begrenzte Aufmerksamkeitsspanne von Säuglingen höchstwahrscheinlich überfordern (vgl. Ruff & Rothbart, 1996). Daher wurden analog zur Studie von Xu & Spelke (2000) diejenigen kleinsten Tonsequenzen verwendet, die größer als drei sind und einem Weber-Bruch von 50% entsprechen: 4er- und 8er-Sequenzen. Die 4er und 8er-Sequenzen wurden in der Rate präsentiert, die bei den 4er-Sequenzen des Experimentes 7 verwendet wurde. Eine 8er-Sequenz, die mit vergleichbarer Dauer einer 4er-Sequenz präsentiert werden soll, würde mit einer erheblich höheren Rate abgespielt werden, was als salientes Unterscheidungsmerkmal genutzt werden könnte. Daher wurde eine bezogen auf die Experimente 6 bis 8 relative große Verlängerung der Dauer der größeren Numerosität in Kauf genommen. Dies erschien tolerierbar, da die absoluten Dauern recht kurz blieben: Sie bewegen sich zwischen einer halben Sekunde und knapp zwei Sekunden; der größtmögliche Unterschied der Dauer beträgt 1.2 Sekunden. Die Dauern des Experimentes 9 waren nicht länger als diejenigen der Experimente 6 und 7. Aufgrund der unregelmäßigen Abfolge unterschiedlicher Dauern, Raten und Numerositäten kann davon ausgegangen werden, dass solche temporalen Faktoren nur sehr begrenzt zur Diskrimination herangezogen werden können. Ansonsten wurde das Experiment in analoger Weise wie die Experimente 6 bis 8 durchgeführt.

Stichprobe

Es wurden 20 Babys mit einem mittleren Alter von 219 Tagen ($SD= 17.3$) untersucht, davon 8 weiblichen und 12 männlichen Geschlechtes. Alle Babys hatten laut Auskunft der Pflegerpersonen ein Geburtsgewicht über 2900 g und ein Gestationsalter, das zwischen 38 und 41 Wochen bei der Geburt war. Die Eltern wurden in diversen Kleinkindgruppen angeworben, durch Aushänge bei Kinderärzten oder von anderen Teilnehmern gewonnen.

Stimuli

Mit Hilfe eines Synthesizers wurden Töne wie im Experiment 8 hergestellt. Aus Tab. 4-14 wird ersichtlich, welche Numerositäten mit welchen Inter-Ton-Intervallen zu welchen Sequenzen mit welchen Dauern realisiert wurden.

Tabelle 4-14. Numerosität, Intertonintervalle und Gesamtdauern der Tonsequenzen

Numerosität	Intertonintervall (msec)	Gesamtdauer (msec)	Tonsequenz
4	73.33	500	4k
4	106.66	600	4m
4	173.33	800	4l
8	73.33	1076	8k
8	106.66	1318	8m
8	173.33	1780	8l

Verfahren und Versuchsablauf

Die Realisation geschah völlig analog zu Experiment 8; die 4er- und 8er-Sequenzen hatten die gleiche Rate (gleiche ITIs) (vgl. Tab. 4-13). Wiederum wurden die 4er-Numerositäten visuell verstärkt und es folgten in zufälliger Abfolge 4l und 8k fünfmal aufeinander. Eine zufällig gezogene Teilmenge von 6 Säuglingen wurde off-line ausgewertet, wobei keine Toninformation zur Verfügung stand und es ergab sich eine Übereinstimmung zu den Urteilen der Person, die online auswertete, die im Mittel bei 91.4% (SD: 2.0%) lag.

Ergebnisse

Keines der 17 Kinder erfüllte das Trainingskriterium. Im Mittel blickten die Säuglinge bei der Präsentation der unverstärkten 8er-Sequenzen 16.6mal zur Schallquelle auf der Bühne (SD=4.8) ($m=55\%$; SD=16%) und bei Präsentation der verstärkten 4er-Sequenzen 17.0mal (SD = 6.6) ($m=57\%$; SD=22%). Dieser Unterschied wird von einem tTest für gepaarte Stichproben als non-signifikant indiziert ($t(16) = .298$, $p=.769$, 2-seitig). Der falsche Alarm liegt im Mittel bei 55% (SD=16%). Das mittlere d' beträgt 0.06 (SD=0.55) und ist nicht signifikant von 0 verschieden ($t(16)=.44$, $p=.667$, 2-seitig). Das Kriterium Beta ist im Mittel 0.943 (SD=0.27) und nicht bedeutsam von 1 verschieden ($t(16)=-.91$, $p=.38$, 2-seitig). Die Säuglinge wandten sich, indiziert durch t-Tests für eine Stichprobe mit dem Referenzmittelwert von 50%, nicht überzufällig häufig mit 64% (SD=24%) der 4er-Sequenz zu ($t(19)=2.62$, $p= .019$, 2-seitig), wohingegen dies für die 8er-Sequenz nicht zutraf, die genau bei 50% (SD=12%) lag.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die im Mittel 7 Monate alte Säuglinge 4 nicht von 8 Tönen unterscheiden können. Daraus kann geschlossen werden, dass der Weber-Bruch für derartige Tonsequenzen größer als 50% ist, vorausgesetzt, Säuglinge können überhaupt größere Numerositäten auditiver Modalität unterscheiden. Auch in diesem Falle ist der Sensitivitätsindex d' so zu verstehen, dass die Säuglinge im Verlaufe von ca. 80 Stimuluspräsentationen, wobei 40 mal die 4er und 40 mal die 8er Sequenzen vorgespielt wurden, nicht lernen, die 4er-Sequenz als diskriminativen Stimulus zu nutzen. Wie in den Experimenten 6 bis 8 tendierten die Babys zu ausgewogenem Kopfdrehverhalten, d.h. die hohe Zahl falsch positiver Reaktionen ging nicht mit immer höheren richtig positiven Reaktionen einher.

Zur Frage der Attraktivität des visuellen Verstärkers kann man sich die mittlere Blickhäufigkeiten zur Bühne in den unterschiedlichen Bedingungen ansehen. Über alle vier

Diskriminationsbedingungen hinweg wurde im Mittel 31.75 (SD=8.8) mal zur Bühne geschaut ($m=53\%$, $SD=15\%$), wobei sich die Blickhäufigkeiten zwischen den Bedingungen nur insignifikant unterschieden ($F(3,75)=1.01$, $p=.39$), und kein Geschlechtseffekt ($F(1,68)=0.03$, $p=.87$) sowie keine Interaktionen beider Faktoren ($F(3,68)=1.24$, $p=.46$) auftraten. Diese Befunde sprechen für eine ausreichende Attraktivität des visuellen Verstärkers.

Die Tatsache, dass die Säuglinge nicht lernten, 4er- von 8er-Sequenzen zu unterscheiden, kann vor allem auf die Numerosität der Tonsequenzen zurückgeführt werden, denn die 4er-Sequenzen waren genauso lange wie die 2er-Sequenzen und die 8er-Sequenzen ähnlich lange wie die 3er-Sequenzen. Allerdings war die Rate in Experiment 9 etwas mehr als doppelt so hoch, jedoch spricht eine insignifikante Korrelation zwischen den d' -Werten der Diskriminationsbedingung 2vs3 und denjenigen der Bedingung 4vs8 von 0.32 ($p=.26$, 2seitig) dagegen, dass die höhere Rate einen systematischen Einfluss hatte.

4. 4. 2. 5 Diskussion der Experimente 6 bis 9

Die "go / no go"-Prozedur dürfte für Säuglinge insbesondere bei längeren Tonsequenzen schwierig sein, da die Säuglinge mit ihrer Reaktion bis zum Ende auch der längeren Sequenzen warten mussten. Daher wird vermutlich eine konservative Abschätzung der diskriminativen Fähigkeiten bezogen auf Ton-Anzahl-Sequenzen, vorgenommen. Die 4er- und 8er-Sequenzen waren allerdings nur unwesentlich länger als die 2er- und 3er-Sequenzen. Die Varianzanalyse der falschen Alarme über die vier Experimente hinweg ($m=51\%$, $SD=17\%$) zeigt einen signifikanten Unterschied ($F(3,74)=3.29$, $p=.025$), wobei durchgeführte post-hoc Scheffé-Tests auf dem Prüfniveau von 10% indizieren, dass der mittlere falsche Alarm der Diskrimination von 2vs3 Tönen mit 41% um 14% und damit tendenziell bedeutsam kleiner ist als derjenige der Diskrimination von 4vs6 kürzere Töne und 4vs8 Töne. Die falschen Alarme der Diskrimination 2vs3 sind mit 10% nicht bedeutsam seltener als diejenigen der Diskrimination 4vs6 (Exp. 7).

Interpretiert man die Experimente 7 bis 9 als Versuch, Säuglingen beizubringen, 4er- und 6er-Tonanzahlsequenzen bzw. 4er- und 8er-Tonanzahlsequenzen zu diskriminieren, so kann festgestellt werden, dass Säuglinge mit einem mittleren Alter von 7 Monate derartige Diskriminationen nicht lernen. Sollten sie überhaupt in der Lage sein, größere Tonanzahlen zu diskriminieren, so würde dies einen Weber-Bruch von mindestens 50% erfordern. Diese Befunde entsprechen denjenigen, die aus den Studien zum Subitizing mit Erwachsenen gewonnen wurden, aber auch den Befunden aus den Experimenten 4 und 5, wo eine Obergrenze des Subitizing bei Numerosität 3 gefunden wurde. Bezüglich der Diskriminierbarkeit kleiner Numerositäten stimmen bei Säuglingen mit einem mittleren Alter von 7 Monaten die visuelle und die auditive Modalität weitgehend überein. Dieser Befund verleiht auch den Befunden von Starkey et al. (1990) eine höhere Plausibilität, die fanden, dass Säuglinge intermodal eine Übereinstimmung zwischen Objekten und Tönen gleicher Anzahl feststellen können, wobei allerdings keine Numerositäten größer als drei geprüft wurden. Es scheint sich um eine fragile Kompetenz mit nur schwachen Performanzeffekten zu handeln, da dieser Befund nicht repliziert werden konnte. Der Befund des Experimentes 6 korrespondiert mit den Befunden Bijeljac-Babics, Bertoncinis und Mehlers (1993), denen zufolge Neugeborene 2 von 3 CV-Silben diskriminieren können; größere Numerositäten wurden jedoch nicht untersucht. Und schließlich stimmt das Ergebnis

mit den Resultaten von Wynn (1995) überein, die visuelle Ereignisse bis zu einer Numerosität bis zu drei untersuchte.

4. 4. 3 Diskussion der Säuglingsexperimente

Säuglinge können 1 von 2, 2 von 3, und eventuell noch 3 von 4 Numerositäten unterscheiden. Es ist unwesentlich, ob es sich um visuelle Objekte oder um visuelle bzw. auditive Ereignisse handelt. Es kann als einigermaßen gesichert gelten, dass Säuglinge auch größere Numerositäten unterscheiden können, wobei die relative Differenz dieser Numerositäten mindestens 50% betragen muss. Im Falle der auditiven Modalität könnte die zur Unterscheidung notwendige relative Differenz sogar noch größer sein. Bei größeren Numerositäten kann diese Diskriminierbarkeit mit dem Weber-Fechner Gesetz beschrieben werden, nicht jedoch im Bereich der kleinen Numerositäten, da zwar 2 von 3, aber nicht 4 von 6 unterschieden werden kann. Säuglinge, die noch nicht symbolisch-sprachlich Zählen können, scheinen sich also ähnlich zu verhalten wie Erwachsene. Auch bei Erwachsenen lässt sich bei ca. 3 eine Enumerationsgrenze feststellen, wenn sie sehr schnell reagieren müssen oder wenn ihnen die Numerositäten nur sehr kurz präsentiert werden. Die Diskriminierbarkeit größerer Numerositäten lässt sich bei Erwachsenen mit dem Weber-Fechner Gesetz beschreiben, der Weber-Bruch ist mit ca. 16% um 68% geringer als bei Säuglingen. Die große Altersstabilität des Subitizing-Phänomens, vom precounting-Subitizing bei Säuglingen bis zum post-counting-Subitizing bei Kindern, jüngeren und älteren Erwachsenen spricht dafür, dass es sich um einen Enumerationsmechanismus handelt, der unabhängig von verbalen Kompetenzen ist und nach anderen Mechanismen zu funktionieren scheint als die relative Numerositätsdiskrimination, zu der auch Tiere fähig sind. Es handelt sich bei diesem Mechanismus um einen Segmentations- oder Individuationsmechanismus, der drei perzeptive Einheiten erzeugt. Diese sind als "Einheit", "Einheit - Einheit", "Einheit - Einheit - Einheit" aufzufassen, welche nicht mit dem Zahlbegriff "Eins", "Zwei" und "Drei" gleichgesetzt werden dürfen. Der Zahlbegriff, der in den Begriffen "eins", "zwei" und "drei" zum Ausdruck kommt, setzt das Wissen um den Ordinal- und Kardinalzahlaspekt sowie das Abstraktionsprinzip voraus. Mit der "zwei" werden zwei Einheiten beliebiger Art zusammengefasst, die für sich genommen in der Relation "kleiner" und "ist Element von" zur "zwei" stehen. Die "Zwei" bezeichnet nicht nur eine Mächtigkeit, sondern kann wiederum als "Eins" aufgefasst werden, die in ordinaler und elementenweiser Beziehung zur "Drei" steht usw. Dieser Prozess der rekursiven Einheitenbildung lässt sich auf Kollektionen beliebiger Zusammensetzung und beliebigen Umfanges anwenden. Zählen ist ein konzeptueller Prozess des Trennens und Verbindens von Einheiten und setzt das Verständnis der unterschiedlichen Zahlaspekte voraus, das nach Piaget reflexive Abstraktion erfordert. Ein solches Zählen ist nicht wie Subitizing auf kleine Numerositäten beschränkt, weswegen Zählen und Subitizing auf unterschiedliche Verarbeitungsebenen bezogen werden müssen: Subitizing auf die Ebene perzeptiver Segmentations- und Bindungsprozesse und Zählen auf die Ebene konzeptueller Analyse- und Syntheseprozesse.

Für die Zweistufigkeit von Subitizing und Zählen sprechen Studien zur visuellen Suche, insbesondere zur Anzahlunabhängigkeit des Pop-out-Phänomens: Werden beispielsweise als Zielelemente 'O' und als Distraktorelemente 'X' verwendet, dann springen die 'O' ins Auge, wohingegen die 'O' in Distraktorelementen vom Typ 'Q' das nicht tun (Trick & Pylyshyn, 1993, 1994a, b). Auch das Subitizing kommt durch einen präattentiven und parallel ablaufenden

Individuationsmechanismus zustande, während das Zählen Identifizieren voraussetzt und serielle Suchprozesse vonnöten macht. Der Individuations-/ Segmentationsprozess stellt repräsentationale diskrete Einheiten bereit und ist damit unabhängig von numerischen und symbolisch-linguistischen Kompetenzen. Im Falle der visuellen Modalität ist es gleichgültig, ob es sich um statische oder bewegte kleine Numerositäten handelt, was die kanonische Musterhypothese widerlegt (z.B. Loosbroek & Smitsman, 1990). Erst auf die Individuationsphase kann diejenige Phase folgen, in der die Anzahl der Einheiten bestimmt werden kann.

Werden Säuglingen wiederholt kleine Anzahlen in Form von Objekten oder Tonereignissen präsentiert, können sie eine Gedächtnisrepräsentation der Numerosität aufbauen. Wird eine abweichende Numerosität präsentiert, können die Säuglinge die Diskrepanz feststellen, was sich entweder an einer Dishabituation in Form einer verlängerten Fixationsdauer oder der Ausbildung einer selektiven, z.B. operant konditionierten Reaktion zeigt. Die Entdeckung einer Numerositätsdiskrepanz setzt nicht nur einen Individuationsmechanismus, sondern auch eine gedächtnismäßige Repräsentation der Numerosität voraus, so dass sie verglichen werden kann. Der Vergleich lässt sich als Diskrimination von "gleich" vs "ungleich" konzeptualisieren, bzw. von "gleichmächtig" vs "nicht gleichmächtig". Allerdings sind die entsprechenden Mechanismen bei kleinen und großen Numerositäten unterschiedlich. Im Falle größerer Numerositäten findet höchstwahrscheinlich keine Eins-zu-Eins-Korrespondenzprüfung durch Paarbildung einzelner Elemente statt. Vielmehr werden kontinuierliche Quantitäten verwendet wie das Ausmaß der belegten Fläche, die Kontrastverteilung oder Phasendifferenzen beim Sehen und temporale Aspekte wie Dauer oder Rate beim Hören. Es handelt sich um eine Quantitäts- und nicht um eine Anzahldiskrimination, also einen Vergleich von viel und wenig, intensiv und nicht-intensiv, lang und kurz, schnell und langsam usw. Allerdings muss der relative Unterschied der Quantitäten ziemlich groß sein, damit die Säuglinge ihn entdecken können, was in dem relativ großen Weber-Bruch zum Ausdruck kommt. Für kleine Numerositäten im Sinne diskreter Quanta gilt das Weber-Fechner Gesetz nur eingeschränkt: Eine relative Unterschiedlichkeit, die in etwa nur halb so groß ist wie bei größeren Numerositäten reicht aus, damit die Säuglinge diese Numerositäten diskriminieren können, was die Annahme rechtfertigt, dass bei Säuglingen dieselben Individuationsmechanismen wirken wie bei Erwachsenen. Dieser Mechanismus des pre-counting subitizing kann als Grundlage numerischer Kompetenzen bei Säuglingen angesehen werden. Schon Säuglinge verfügen anscheinend über die basalen Aufmerksamkeits- und Segmentationsmechanismen, was durch einige Studien zur visuellen Suche und zum Pop-out-Phänomen bei Säuglingen belegt wird (z.B. Rovee-Collier, Hankins, & Bhatt, 1992; Rieth & Sireteanu, 1994; Colombo, Ryther, Frick, & Gifford, 1995; Sireteanu, 2000). Diese belegen außerdem, dass Säuglinge Stimuluskonfigurationen gedächtnismäßig repräsentieren, vertraute wiedererkennen und neue Konfigurationen von alten diskriminieren.

Von den zwei Modellen für das Subitizing, FINST- und Object-file-Modell, scheint vor dem Hintergrund der referierten Befunde das FINST-Modell angemessener zu sein, da es gewissermaßen ein Teilmodell der frühen Phase der Einheitenbildung im Object-file-Modell ist. Das FINST-Modell scheint aber nicht geeignet, die analogen Diskriminationsverhältnisse im Bereich der auditiven Modalität zu erklären. In diesem Bereich könnte das Zähler-Akkumulator-Modell von Meck und Church (1983) die Tonanzahldiskrimination besser modellieren. Dieses Modell wurde zur Erklärung der Diskrimination von Zeitdauern bei Tieren entwickelt und ist durch einen ereignisbezogenen

Arbeitsmodus gekennzeichnet. Es ist eine Anwendung der scalar timing theory (z.B. Gibbon, 1991), die annimmt, dass die Varianz der Reaktionsrate im Intervall zwischen zwei normalverteilten diskriminativen Stimuli mit der Intervalldauer zunimmt. Diese Phänomene wurden mit Hilfe einer inneren Uhr erklärt, die aus einem Schrittmacher, einem Schalter und einem Akkumulator besteht. Ein externes Signal schließt den Schalter, so dass die Impulse des Schrittmachers in den Akkumulator eingelesen werden können. Am Ende des Signals öffnet sich der Schalter wieder und der "Füllungszustand" des Akkumulators wird in das Arbeitsgedächtnis eingelesen, wo es über einen Komparator mit dem Referenzgedächtnis, das den Referenzfüllungszustand enthält, verglichen werden kann. Das Referenzgedächtnis ist eine Langzeitgedächtniskomponente, die die Repräsentate von Akkumulatorzuständen vergangener Durchgänge enthält. Dieses Modell eines "inneren Metronoms" erklärt die Befunde der prospektiven Schätzung der Intervalldauer zweier diskriminativer Stimuli bei Tieren dadurch, dass eine Reaktion wahrscheinlicher wird, wenn der Füllungszustand des Akkumulators im Arbeitsgedächtnis mit dem Referenzfüllungszustand übereinstimmt. Es muss jedoch gefragt werden, ob dieses Modell als präverbales Zählmodell akzeptiert werden kann, wie dies Gallistel & Gelman (1992) vorschlugen. Es wurde für die prospektive Einschätzung der leeren Dauer zwischen zwei diskriminativen Stimuli entwickelt, wohingegen die Enumeration von Tönen in den beschriebenen Experimenten mit Säuglingen prospektive und retrospektive Einschätzungen erforderte. Da die Dauer der Sequenzen gleicher Numerosität unterschiedlich war, konnte die Aufgabe nicht allein prospektiv bewältigt werden. Um erfolgreich zu sein, musste auch retrospektiv die Anzahl der Ereignisse mit Referenzanzahlen verglichen werden, was die Ausbildung einer episodischen Gedächtnisspur über kleinere Ereignis-Numerositäten-Sequenzen erforderlich machte. Dies bedeutet, dass das Ende der Ereignissequenz abgewartet werden musste und erst dann geprüft werden konnte, ob die Sequenz mit der verstärkten übereinstimmt.

Zur retrospektiven Einschätzung der Dauer konnte noch kein entsprechendes Paradigma in tierpsychologischen Studien realisiert werden (Block & Zakay, 1996). Das retrospektive Einschätzen von Dauern funktioniert nur bei Versuchsteilnehmern mit der verbalen Instruktion, nach einer bestimmten Dauer die Länge dieser einzuschätzen. Es scheint daher plausibel, dass auch Säuglinge mit der Versuchsanordnung der Experimente 6 bis 9 nicht dazu veranlasst werden können, größere Ereignisnumerositäten retrospektiv einzuschätzen. Es muss offen bleiben, ob dies an den bis dato realisierten Versuchsanordnungen liegt oder ob Säuglinge noch nicht über die Kompetenz zu retrospektiven Einschätzungen und Vergleichsoperationen verfügen. Im Falle der intermodalen Korrespondenzpräferenz, die Starkey et al. (1990) fanden, war die Aufgabe für die Säuglinge einfacher, da sich die Präsentation der Schallereignisse sowie die der visuellen Objekte zeitlich überlappten und so den wechselseitigen Abgleich beider Numerositäten förderte.

Ein weiterer Mangel des Zähler-Akkumulator-Modelles ist, dass in diesem Modell keine expliziten Annahmen über die steuernde Rolle der Aufmerksamkeit gemacht werden. Die Aufmerksamkeitskontrolle beeinflusst die Zeitschätzung (z.B. Macar, Grondin, & Casini, 1994), was auf die Enumeration von Tonereignissen übertragen werden kann. Ein um die Komponente "Aufmerksamkeit" erweitertes Akkumulator-Modell ist das 'attentional-gate'-Modell von Block & Zakay (1996). Zwischen Schrittmacher und Schalter befindet sich hierbei ein Aufmerksamkeitsstor, das die Verbindung zwischen Schrittmacher und Schalter moderieren kann. Das Aufmerksamkeitsstor wird

durch interne Zustände wie Erregung oder Ressourcenallokationsstrategien mehr oder weniger weit geöffnet und der Schalter wird von äußeren Signalen getriggert. Der Akkumulator wird kognitiver Zähler genannt, da kognitive Kontrollprozesse Zufluss und Auslesen regulieren. Eine Anwendung dieses Modelles auf die Enumerationskompetenzen von Säuglingen ist zwar spekulativ, aber die wenig entwickelte Aufmerksamkeitskontrolle bei Säuglingen scheint die größeren Aufmerksamkeitsfluktuationen von Säuglingen und zusätzliche Varianz beim Enumerieren von Schallereignissen zu erzeugen.

Zähler-Akkumulator-Modell und FINST-Modell können für die jeweiligen Modalitäten erklären, dass Säuglinge nur kleine Numerositäten diskriminieren können. Im Falle kleiner Numerositäten kann diese Diskrimination auf der Prüfung einer Eins-zu-Eins-Beziehung der Diskriminanda beruhen, im Falle größerer Numerositäten ist dies jedoch unplausibel.

5 Diskussion

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

5.1.1 Experimente zum Subitizing

Subitizing wird typischerweise in Studien gefunden, die die Reaktionszeit (RT) als abhängige Variable verwendeten. Wird die RT als Funktion der Numerosität gemessen, steigt die Reaktionszeit bei kleinen Numerositäten kaum an, wohingegen bei größeren Numerositäten, meist beginnend mit 3 oder 4, die Reaktionszeit erheblich stärker ansteigt. Diese Diskontinuität in der RT-Funktion wird als Evidenz für mindestens zwei Arten des Erkennens von Numerositäten angesehen.

Im wesentlichen gibt es zwei Erklärungsansätze für den Subitizing-Mechanismus: Einer geht von einem Ein-Prozess-Modell der Enumeration, der andere von einem Zwei-Prozess-Modell aus. Dem ersten Ansatz zufolge (Gallistel & Gelman, 1992) ist Subitizing ein Prozess des non-verbalen Zählens, der konform zu den Prinzipien des verbalen Zählens ist. Da das Erfassen kleiner Numerositäten schneller abläuft als das Benennen mit Zahlwörtern (Mandler & Shebo, 1982), nehmen Gallistel & Gelman (1992) einen präverbalen Zählmechanismus an. Der zweite Ansatz, der von Trick & Pylyshyn (1994a) vertreten wird, sieht Subitizing als Resultante eines Stadiums der frühen visuellen Informationsverarbeitung, welches durch das Individuieren von Objektmerkmalen gekennzeichnet ist, aus denen Objekte konstruiert werden. Subitizing spiegelt demzufolge Eigenschaften des Bindungs-Prozesses im visuellen System wider. Das Ein-Prozess-Modell von Gallistel & Gelman interpretiert Subitizing folglich als eine numerische Kompetenz, als sehr schnelles, präverbales Zählen, das Zwei-Prozess-Modell hingegen als non-numerische Kompetenz.

Es gibt eine dritte Position, die Subitizing als Methoden-Artefakt erklärt. Balakrishnan & Ashby (1992), die diese Position vertreten, halten die statistische Analyse der mittleren RT-Numerositäts-Funktionen für fragwürdig. Jede Erhöhung der Numerosität würde zu einer Erhöhung der Reaktionszeit führen, was gegen das Zwei-Prozess-Modell spräche. Balakrishnan & Ashby lehnen die kanonische Musterhypothese Mandlers & Shebos (1982) ab, die die sehr schnellen Enumerationszeiten für kleine Numerositäten auf die hochvertrauten Muster wie Gerade, Dreieck und Viereck zurückführt. Denn der Vergleich der Reaktionszeiten zwischen kanonischen Mustern und linear angeordneten Punkten ergab keinen Vorteil für die Muster. Vielmehr gehen Balakrishnan & Ashby von einer "limited capacity of visual attention" unter Verweis auf die klassische Arbeit von Miller (1956) aus. Subitizing würde innerhalb der von Miller postulierten Aufmerksamkeitsspanne von 7 +/- 2 Informationsverarbeitungseinheiten liegen, wenn man berücksichtigt, dass Millers Schätzwerte nur auf einer 50% - Genauigkeit der Reaktionsmaße beruhten, wohingegen bei Genauigkeitsanforderungen über 90%, wie sie typisch für Subitizing seien, das Limit auf 3 bis 4 Items absinkt. Balakrishnan & Ashby lehnen es daher ab, in Subitizing eine besondere numerische Kompetenz zu sehen ("unique numerical ability").

Die Fragen, ob Subitizing ein eigenständiger Prozess ist, und ob Subitizing ein numerischer oder non-numerischer Prozess ist, sind unabhängig voneinander. Sowohl das Ein-Prozess- als auch das Zwei-Prozess-Modell kann sowohl als Ausdruck numerischer als auch non-numerischer Kompetenzen interpretiert werden. Diese Modelle beziehen sich allerdings in erster Linie auf RT-Numerositäts-Funktionen, die bei zählkompetenten Erwachsenen erhoben wurden, weswegen Davis & Pérusse (1988) folgend von post-counting-subitizing zu sprechen ist. Daher sollten die Experimente 1 und 2

überprüfen, ob sich Subitizing als eigenständiger Prozess identifizieren lässt. Im Vordergrund stand, ob sich Evidenzen zugunsten des Ein- oder Zwei-Prozess-Modells finden.

Mit der Bestimmung der Zeit-Genauigkeits-Funktionen (ZGF) wurde eine Methode angewandt, die die Probleme des Geschwindigkeits-Genauigkeitsabgleiches und der motorischen Ausführungszeit vermeidet und geeignet ist, Subitizing als eigenständigen Prozess zu identifizieren. Für jede Numerosität wurde eine psychometrische ZGF ermittelt, wobei jede ZGF die Messung der Diskriminierbarkeit zweier Numerositäten n und $n+1$ in Abhängigkeit von 15 verschiedenen Darbietungszeiten wiedergibt. Im Experiment 1 wurde eine 2AFC, in Experiment 2 eine 1AFC verwendet. Es wurde nicht direkt nach der Numerosität gefragt, sondern danach, ob n oder $n+1$ Punkte ($n=0$ bis $n=6$) zuerst bzw. ob n oder $n+1$ Punkte zu sehen waren.

Die einzelnen ZGF wurden durch Exponentialfunktionen (entsprechend dem Modell der mittleren proportionalen Reduktion von Fehlerwahrscheinlichkeiten) beschrieben. Als freie Parameter wurden b (Steigung) und a (Ordinatenschnittpunkt) geschätzt, wobei b als Rate der Informationsaquisition und a als Initialisierungszeit interpretiert wurden. Um zu entscheiden, ob Subitizing ein eigenständiger Prozess ist, wurde erwartet, dass die b -Parameter innerhalb des angenommenen Subitizing-Bereiches im Gegensatz zu denjenigen außerhalb diesen Bereiches nicht bedeutsam größer werden. Die Grenze des Subitizing-Bereiches wird durch diejenigen beiden ZGF markiert, für welche gilt: b -Parameter (ZGF-außerhalb) $>$ b -Parameter (ZGF-innerhalb). Die statistische Prüfung dieser Annahme erfolgte so, dass zunächst ein Basismodell angepasst wurde, in welchem die b -Parameter nicht kleiner als 1 werden konnten, aber ansonsten frei geschätzt wurden. Dann wurden sukzessive b -Parameter, beginnend mit den ZGF der kleinsten Numerositäten, einander gleichgesetzt und deren Anpassungsgüte mit derjenigen des Basismodelles verglichen. Die erste bedeutsame Abweichung des Anpassungsindex von demjenigen des Basismodells markierte die Grenze des Subitizing.

Die Ergebnisse sprechen für die Existenz zweier unterschiedlicher Enumerationsprozesse. Die geschätzten ZGF sind in einem Bereich bis 3 bzw. 4 statistisch nicht unterscheidbar, bei größeren Numerositäten unterscheiden sie sich. Innerhalb des Subitizing-Bereiches werden Numerositäten von 1 bis 4 gleichschnell erfasst, wohingegen der Zeitbedarf zur Enumeration außerhalb dieses Bereiches bedeutsam zunimmt. Die Anwendung einer verbesserten Methode führt also zu einem Befund, der mit Befunden einer Reihe anderer Studien übereinstimmt.

Im Experiment 3 wurde geprüft, wie das Phänomen Subitizing vom Alter abhängt. Es wurde die gleiche Methodik wie in den Experimenten 1 und 2 mit etwas anderen Darbietungszeiten angewandt. Die untersuchten älteren und jüngeren Personen belegten gleichermaßen das Phänomen Subitizing: Im Bereich kleiner Numerositäten bis 4 unterschieden sich die ZGF nicht bedeutsam voneinander, wohingegen der Unterschied zu den ZGF größer als 4 bedeutsam war. Wichtig ist, dass dieses Muster nicht mit dem Alter kovarierte, auch wenn die älteren Personen konstant mehr Zeit zur Informationsverarbeitung benötigten als die jungen.

Die drei Experimente belegen die Zwei-Prozess-Theorie der Enumeration und demonstrieren, dass Subitizing die Resultante eines eigenständigen Prozesses ist. Allerdings lassen diese Befunde keine Antwort darauf zu, ob es sich beim Subitizing um eine numerische Kompetenz handelt. Ist Subitizing eine Art des schnellen, perzeptiven, prä- oder nonverbalen Zählens oder die Wahrnehmung eines Einer-, Zweier-, Dreier- oder Vierer-Objektes? Da der überwiegende Teil der Subitizing Studien post-counting-Subitizing erfasst, kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine hochgeübte verbale Zählkompetenz Subitizing fördert oder gar verursacht.

5. 1. 2 Experimente zur Anzahldiskrimination bei Säuglingen

Darin Davis & Pérusse (1988) folgend schien es zweckmäßig, pre-counting-Subitizing zu untersuchen. Wenn verbale Zählkompetenz sicher nicht vorhanden ist, so sollte eine vergleichbare Enumerationsgrenze die Eigenständigkeit des Subitizing konvergent validieren. Neben diese allgemeinpsychologische Fragestellung trat eine entwicklungspsychologische: Eine Reihe von Studien ergab, dass Säuglinge kleine Numerositäten unterscheiden können. Diese Fähigkeit wurde im Sinne einer präverbalen numerischen Kompetenz interpretiert (Gallistel & Gelman, 1992), wobei diese principles first - Sichtweise davon ausgeht, dass Anzahlerfassung und Anzahlvergleich nach angeborenen Zählprinzipien ablaufen (Gelman & Gallistel, 1978). Wynn (1995) behauptet sogar: That infants “ have a means of determining and representing number per se. Furthermore, infants are able to reason numerically about these representations; they possess procedures for operating over these representations in numerically meaningful ways, and so can appreciate the numerical relationships that hold between numerical quantities. They can thus be said to possess a genuine system of numerical knowledge. These early capacities suggest the existence of an unlearned core of numerical competence” (S. 35). Da die Performanzen, die solchen Kompetenzen zugrunde liegen sollen, stets nur bei kleinen Numerositäten beobachtet wurden, scheint die Alternativannahme, dass diese Performanzen ausschließlich auf Subitizing beruhen, wesentlich sparsamer. Die Frage, ob Säuglinge über numerischer Kompetenzen verfügen oder nicht ist die Frage nach Startkompetenzen von Säuglingen, die die Basis alterskorrelierter Veränderungen dieser Kompetenz bilden.

Daher war die Fragestellung der Experimente 4 und 5, ob sich die aus dem Subitizing bekannten Enumerationsgrenzen bei Säuglingen finden lassen. Ein solches “precounting subitizing” ließe sich vermuten, wenn das Weber-Fechner Gesetz im Bereich kleiner Numerositäten nicht gelten würde. Da im Subitizing-Bereich das Erfassen und Unterscheiden von n und $n+1$ Numerositäten mit gleichem Zeitbedarf verbunden ist (vgl. die Experimente 1-3), wäre zu erwarten, dass den Babys die Diskrimination kleiner Numerositäten z.B. 2 vs 3 gelingt, dass sie aber trotz des selben Weber-Bruches 4 nicht von 6 unterscheiden können. Da Säuglinge Numerositäten nicht verbal benennen können, wurde die Diskriminationsleistung über die Habituationstechnik geprüft. Das Ergebnis des Experimentes 4 war, dass im Mittel 7 Monate alte Säuglinge zwar 2 von 3 Objekte unterscheiden konnten, aber nicht 4 von 6 Objekten. Mit großer Sicherheit können Effekte der Habituationsbedingung, der Testabfolge und der Stimuluskomplexität ausgeschlossen werden. Der Ergebnis repliziert den Befund, den Starkey & Cooper (1980) bei im Mittel 4 Monate alten Babys fanden. In Experiment 5 wurde geprüft, ob sich eine dem postcounting subitizing vergleichbare obere Enumerationsgrenze finden lässt. Es wurde untersucht, ob Säuglinge mit einem mittleren Alter von 7 Monaten bei ansonsten gleicher Methode wie in Experiment 4 3 von 4 und 4 von 5 Objekten unterscheiden können. Die Ergebnisse belegen, dass Babys 3 von 4, aber nicht 4 von 5 Objekten unterscheiden können. Damit wird eine Obergrenze von 3 nahe gelegt, was mit einer Reihe von Subitizing-Studien bei Erwachsenen sowie den Experimenten 1 bis 3 übereinstimmt. Das Weber-Fechner Gesetz gilt also für die Diskrimination kleiner Numerositäten nur eingeschränkt. Diesen Befund stützen auch die Ergebnisse von Xu & Spelke (2000): Im Mittel 6 Monate alte Säuglinge konnten 8 von 16, aber nicht 8 von 12 Punkten unterscheiden, wobei letztere Diskrimination den selben Weber Bruch wie 2 vs 3 Punkte hat. Säuglinge können also auch größere Anzahlen, die eine Differenz von mindestens 50% aufweisen, diskriminieren. Im Falle kleinerer Anzahlen können sie dies aber schon bei einer Differenz von 25% (3 vs 4). Diese Befunde sprechen für die Existenz eines

separaten Mengenerfassungsmechanismus, der dem Subitizing zugrunde liegt. Da Babys nicht verbal zählen können, weisen diese Befunde precounting subitizing nach.

Dieser Nachweis des precounting subitizing bleibt zunächst auf die visuelle Modalität beschränkt. Einige wenige Studien zeigten, dass im Mittel 6 bis 7 Monate alte Säuglinge kleine Numerositäten realisiert als Bewegungsänderungen, d.i. Ereignisse in der visuellen Modalität (Wynn, 1995) oder als Töne (Starkey, Spelke, & Gelman, 1990) erfassen können. In der Studie von Starkey et al. (1990) wurden jedoch Töne nicht separat enumeriert, sondern ein intermodaler Mächtigkeitsabgleich zwischen 2 oder 3 gehörten Tönen und 2 oder 3 gesehenen Objekten durchgeführt, wobei die Blickpräferenz für eine gesehene Numerosität der zuvor gehörten Tonnumerosität entsprach: Es wurden diejenigen Objekte häufiger angesehen, deren Anzahl mit derjenigen der zuvor gehörten Töne übereinstimmte. Neben der Frage, warum die Säuglinge die Korrespondenz und nicht die Diskrepanz präferierten, ist offen, ob die Präferenz für die korrespondierenden Objekte durch ein separates Enumerieren der Töne und der Objekte und einen daran anschließenden Eins-zu-eins-Vergleich zustande kam oder ob es sich um einen Artefakt handelt. Die Annahme, dass Säuglinge nicht nur Relationen zwischen Objekten, sondern auch zwischen kleinen Objektmengen herstellen können, konnte durch zwei Replikationsversuche nicht gestützt werden. Mix, Levine und Huttenlocher (1997), die keinen intermodalen Numerositätsabgleich bei im Mittel 7 Monaten alten Säuglingen feststellen konnten, betonten, dass unklar ist, wie Säuglinge einzelne Töne diskriminieren und Tonfolgen zu einer Numerositätssequenz integrieren. Bijeljac-Babic, Bertocini & Mehler (1993) fanden bei im Mittel 4 Tage alten Säuglingen mit der high amplitude sucking-Methode, dass diese Numerositäten aus Tonsequenzen unterscheiden konnten, und zwar 2 von 3 Konsonant-Vokal-Silben, aber nicht 4 von 6 Konsonant-Vokal-Silben.

In den Experimenten 6 bis 9 wurde daher die Fragestellung bearbeitet, ob Säuglinge kleine Tonsequenzen diskriminieren können. Untersucht werden sollte, ob sich den Experimenten 4 und 5 vergleichbare Befunde finden lassen, weswegen Tonsequenzen als paarweise Diskriminanda verwendet wurden, die aus 2 vs 3, 4 vs 6 und 4 vs 8 gleichklingenden, gleichlauten und gleichlangen Tönen bestanden. Deren Rate wurde so variiert, dass je eine Sequenz kurzer, mittlerer und langer Dauer entstand. Es wurde eine operante Technik, die konditionierte Kopfdrehmethode, in Form einer "Go - no go"-Entdeckungsaufgabe durchgeführt. In der Trainingsphase wurden die Säuglinge visuell verstärkt, den Kopf in Richtung des Verstärkers zu drehen, wenn ein Tonsequenz mittlerer Dauer abgespielt wurde. Das Ergebnis war, dass die Säuglinge 2 von 3 Tönen unabhängig von deren Dauer diskriminieren konnten. Dieses Resultat stimmt mit den Befunden von Bijeljac-Babic et al. (1993) überein. Es passt auch zu den Befunden des intermodalen Mengenabgleiches von Starkey et al. (1990), wobei allerdings zu bedenken ist, dass Moore et al. (1987) und Mix et al. (1997) keine Hinweise auf einen solchen intermodalen Mengenabgleich mit 2er- und 3er-Numerositäten bei Säuglingen mit einem mittleren Alter von 7 Monaten fanden. Zusammen mit den schwachen Effekten, die Starkey et al. (1990) berichteten, legen die Befunde von Moore et al. sowie Mix et al. nahe, dass der intermodale Mengenabgleich für die Säuglinge kaum möglich sein dürfte.

In Experiment 7 wurde mit der gleichen Methode wie in Experiment 6 untersucht, ob Säuglinge vergleichbaren Alters 4 von 6 Tönen unterscheiden können, die den selben Weber-Bruch wie 2 vs 3 Töne aufweisen. Es ergab sich, dass die Säuglinge 4 von 6 Tönen nicht diskriminieren konnten, was mit den Befunden aus der visuellen Modalität gut übereinstimmt. Auch der Versuch, durch Verkürzung der Tonsequenzen die Diskrimination der 4er- und 6er- Tonsequenzen zu erleichtern (Experiment 8), ergab, dass die Säuglinge diese nicht diskriminieren konnten. In Experiment 9

schließlich wurde untersucht, ob ein Weber-Bruch von 50%, der in der visuellen Modalität ausreichend war, um größere Numerositäten außerhalb des Subitizing-Bereiches zu diskriminieren, auch im Bereich auditiver Numerositäten zu einer besseren Diskriminierbarkeit führt. Verwendet wurden 4er- und 8er-Tonsequenzen, wobei die gleiche Methodik wie in den Experimenten 6 bis 8 angewandt und die gleiche Altersgruppe untersucht wurde. Es war festzustellen, dass die Säuglinge 4 von 8 Tönen nicht unterscheiden können. Dies kann bedeuten, dass der Weber-Bruch von 50% in der auditiven Modalität zu klein ist. Es kann aber auch bedeuten, dass es für Säuglinge diesen Alters zu schwer ist, längere Tonsequenzen miteinander zu vergleichen. Die Diskrimination von Tonsequenzen stellt andere Anforderungen an die Informationsverarbeitung als die Diskrimination simultan präsentierter visueller Numerositäten.

5. 2 Allgemeinpsychologische Diskussion

5. 2. 1 Mechanismen des Subitizing

Im folgenden soll diskutiert werden, welche Mechanismen dem Subitizing zugrundeliegen und ob bzw. wie diese mit der Zählkompetenz zusammenhängen.

Sowohl die Experimente mit Erwachsenen als auch mit Säuglingen belegen, dass Subitizing als ein eigenständiger, nonverbaler Mengenerfassungsprozess verstanden werden kann, der allerdings auf eine kleine Menge von Objekten bzw. Ereignissen beschränkt ist. Subitizing lässt sich im Bereich der visuellen Modalität gut mit Theorien der objekt-basierten visuellen Aufmerksamkeit erklären. Dem FINST- und dem object-file-Modell zufolge ist Subitizing das Resultat von Bindungs- und Segmentationsprozessen, die in den frühen Verarbeitungsstufen der visuellen Wahrnehmung ablaufen. Diese Prozesse konstituieren den Aufbau von Objekt- und Ereignisrepräsentationen. Die Mechanismen von Subitizing sind Bestandteil des Modells der Objekt- und Ereignisrepräsentation sowie der Integration von Prozessen der Objekt- und Ereigniskognition. Die Ergebnisse zur objekt-basierten visuellen Aufmerksamkeit bei Erwachsenen und die zur Objektpermanenz bei Säuglingen lassen sich durch die Annahme selektiver Aufmerksamkeit durch deiktische Prozesse verbinden (Ballard et al., 1997; Leslie et al., 1998), welche vor allem auf computationalen Modellen der visuellen Wahrnehmung (z.B. Ullman, 1984) basiert. Ballard et al. (1997) heben allerdings hervor, dass Kognitionen verkörpert, also keineswegs bloß "soft-ware" sind. Damit ist gemeint, dass ein Organismus aufgrund seiner anisotropen biophysikalischen "hard-ware" zu einem bestimmten Zeitpunkt stets nur auf einen Ausschnitt seiner Umgebung ausgerichtet ist. Die Ausrichtung dessen sensu-motorischer Systeme auf ein Objekt trägt den Charakter des Zeigens (Deixis): Paradigmatisch dafür ist das Zeigen mit dem Zeigefinger auf ein Objekt, aber auch das Fixieren mit den Augen hat deiktischen Charakter. Die Repräsentation der Gesamtumgebung des Organismus wird zusammengesetzt aus den sukzessiven Ausrichtungen des Organismus auf bestimmte Umgebungsmerkmale. Die Notwendigkeit zu einer seriellen Zusammensetzung der Umgebungsrepräsentation ergibt sich aus zwei grundlegenden Beschränkungen jedes Organismus: Zum einen sind die sensu-motorischen Systeme selektiv, denn jedes Sinnessystem hat einen bestimmten Messbereich und eine bestimmte Messgenauigkeit und ein Greiforgan wie die Hand kann nicht Objekte beliebiger Größe und Anzahl zu einem Zeitpunkt erfassen und manipulieren. Zum anderen macht es die kognitive Ökonomie erforderlich, soweit wie möglich die Umgebung als Gedächtnisstütze zu benutzen (z.B. O'Regan, 1992). Wäre das nicht möglich, müsste zu jedem

Zeitpunkt die gesamte Umgebung repräsentiert werden, was zu Kapazitätsproblemen führen würde, denn zu jedem Bestandteil der Szene müsste ein passendes internes Modell gesucht werden. Zahlreiche Studien zur selektiven Aufmerksamkeit zeigten, dass visuelle Szenen nur unvollständig repräsentiert werden, wozu auch die klassische Unterscheidung zwischen Blickpunkt und Blickfeld gehören. Ballard et al. (1997) heben hervor, dass diese selektive Informationsverarbeitung nicht nur an der Peripherie der Sinnessysteme festzustellen ist, z.B. bei den ständigen Augenbewegungen, um ein Objekt auf die Fovea abzubilden, sondern sie lässt sich auf die zentralen Prozesse der Aufmerksamkeit übertragen. Deiktische Prozesse erlauben eine ökonomische Informations-verarbeitung und sind also konstitutiv für die Kognition. Die Analogie zum Zeigen mit Hand und Finger verdeutlicht dies: Durch Zeigen auf ein Objekt reduziert man den kognitiven Aufwand erheblich; das Objekt wird durch das Anzeigen markiert und aus den anderen Objekten der Umgebung herausgehoben, die nicht weiter beachtet werden müssen. Durch die Fixierung kann das Objekt hinsichtlich weiterer Merkmale analysiert werden. Das Anzeigen realisiert die örtliche Objektindividuation, wodurch die Objektidentifikation möglich wird. Ähnlich funktionieren das visuelle Fixieren und die selektive Aufmerksamkeit: Ballard et al. (1997) nennen dies eine deiktische Strategie, die sie mit 'do-it-where-I'm-looking' bezeichnen (S.725). Sensu-motorische Primitive wie einzelne Blicksakkaden nennen Ballard et al. (1997) "deictic sensory-motor primitives". Die Verwendung von mentalen Zeigern (Ballard et al. sprechen im Zusammenhang mit der Aufmerksamkeit von "a neural way of pointing") löst das Variablen-Bindungsproblem, ohne dass fortlaufend große Mengen von Informationen neu "kopiert" werden müssen. Dies wiederum aktiviert einen Zeiger, der auf bestimmte Gedächtnisadressen und Subroutinen verweist. Wenige Zeiger können also spezifische Gedächtnisadressen aktivieren, die wiederum Adressenverweise beinhalten können, so dass der Suchraum durch ein Netz aus Pfaden von Zeigern strukturiert werden kann. Die Veränderung der Blickfixation kann analog zur Veränderung einer Gedächtnisadresse im Silikon-Computer verstanden werden, wobei die Außenwelt als Gedächtnissystem fungiert.

Die Indexing-Hypothese (Leslie et al., 1998)

Im FINger-INSTantiation-Modell (FINST) wird ein mentaler Zeiger, ein Index, postuliert, der wie ein Finger auf ein Objekt in der Welt zeigt. Wie das Zeigen mit dem Finger beinhaltet dieses mentale Zeigen keinerlei Information über die Eigenschaften des angezeigten Objektes. Durch Anzeigen von Merkmalen können diese aber mit Gedächtnisadressen verknüpft und zu Merkmalsstrukturen verbunden werden, die erlebnismäßig Objekten entsprechen. Dieser Gedanke korrespondiert mit der feature integration theory von Treisman (1988).

Leslie et al. (1998) verallgemeinern die Kernannahme des FINST- und object-file-Modells zu einer Indexing-Hypothese. Sie gehen dem FINST-Modell folgend davon aus, dass die Anzahl der objekt-indizierenden mentalen Zeiger auf 4 beschränkt ist. Die "ökonomische" Begründung für diese Kapazitätslimitierung wurde in der Beschreibung des FINST-Modells (Kap. 3.2.2.1) dargestellt. In einer Verarbeitungsepoche können nicht viele Zeiger verwendet werden, da dann das Aktualisieren jeder Verarbeitungsepoche computationell unmöglich wird. Es ist ökonomischer, nur wenige Merkmale pro Verarbeitungsepoche zu aktualisieren und die anderen nur zu approximieren, da sonst in jeder neuen Verarbeitungsepoche jedes Merkmal der vorhergegangenen Verarbeitungs-epoche geprüft werden müsste. Studien zum Erkennen visueller Szenen belegen, dass diese größtenteils nur approximativ repräsentiert werden (z.B. Intraub, 1997). Eine kleine Anzahl von Zeigern reicht aus, um

saliente Veränderungen zwischen den Verarbeitungsepochen festzustellen, z.B. gleichsinnige Bewegungsänderungen, wobei top-down-Prozesse wie Erwartungen eine ebenfalls ökonomisierende Funktion erfüllen. Bezogen auf die Säuglingsforschung ist das Indexing die Basis für die Individuation, Identifikation und Enumeration von physikalischen Objekten. Das Objekt-Indizieren ist daher eine plausible Ursache für das precounting-subitizing.

Was ist unter einem Objekt-Index zu verstehen?

- (1) Ein Objekt-Index ist ein mentaler Anzeiger, der sich auf Objektprimitive oder Objekte bezieht.
- (2) Der Index repräsentiert nicht die Eigenschaften oder Merkmale ('features'), die er anzeigt. Der Index ist zwar an das Objekt gebunden, aber repräsentiert z.B. nicht dessen Farbe oder Form.
- (3) Der objekt-indizierende Mechanismus ist ressourcen-limitiert; es dürfte nur ca. vier Zeiger geben.
- (4) Das Zuweisen der Zeiger erfolgt nach der Lokation der Objekte im Raum.

Es gibt 4 Prinzipien der Zeiger-Zuweisung:

- (i) Jedem distinkten Objekt kann nur ein einziger Zeiger zugewiesen werden.
- (ii) Der Zeiger bleibt am Objekt "haften", auch wenn sich das Objekt bewegt und seine Lokation verändert.
- (iii) Distinkte Indizes können Objekten nur zugewiesen werden, wenn die Objekte unterschiedliche Orte im Raum einnehmen
- (iv) Da es nur eine kleine Anzahl von Indizes gibt, müssen sie wiederverwendet und vor der Wiederverwendung vom Objekt gelöst werden.

Diese 4 Prinzipien werden mit einer Entwicklungshypothese verknüpft: Wenn räumliche Information nicht zur Verfügung steht oder mehrdeutig ist, dann können auch Merkmalseigenschaften (z.B. Farbe) die Zeiger-Zuweisung steuern. Dies ist jedoch innerhalb des ersten Lebensjahres nicht möglich, da nach Leslie et al. (1998) Merkmalseigenschaften wie Farbe Ortsindividuierung voraussetzt.

Der objekt-indizierende Prozess ist sowohl Bestandteil des FINST- als auch des object-file-Modells (vgl. Kap. 3.2.2.1). Es gibt neuroanatomische Hinweise, dass im Sehen Merkmals- und Ortsinformation getrennt verarbeitet werden ("Was-System", "Wo-System"). Das Wo-System spielt für die Objektindizierung die grundlegende Rolle, denn eine kleine Anzahl von Objekten kann simultan indiziert werden; die Indizierung erfolgt lokationsbasiert und unabhängig von Aussehen und Bewegung des Objektes; auch zwischenzeitig verdeckte Objekte werden indiziert. Im Was-System erfolgt die Objekt-Bindung merkmalsbasiert, wie Studien zum Pop-out-Phänomen und zur visuellen Suche belegen (vgl. Trick & Pylyshyn, 1994a). Daher muß zwischen Objektindividuation durch Lokation einerseits und durch Merkmale andererseits unterschieden werden. Zwischen beiden besteht eine einseitige Abhängigkeit: Erstere ist die Voraussetzung dafür, dass Objektidentität festgestellt werden kann, auch wenn sich Merkmale des Objektes ändern. Säuglinge können also erst dann etwas über Objektmerkmale lernen, wenn sie in der Lage sind, Objekte zu individuieren und bei Bewegungen zu verfolgen.

Eine weitere Unterscheidung muß zwischen Objektindividuation und Objektidentifikation getroffen werden. Objekte können nur durch Merkmale identifiziert werden, was deren Bindung an das Objekt erforderlich macht. Dies ist jedoch nur möglich, wenn zuvor das Objekt durch Indizierung individuuiert worden ist.

Am einfachsten lässt sich dies verdeutlichen, wenn man sich vorstellt, man bekäme jeweils ein Objekt gezeigt, das aus einem undurchsichtigen Behälter A herausgenommen und in einen undurchsichtigen Behälter B hineingelegt wird. Man kann nun eine Individuations- oder eine Identifikationsfrage gestellt bekommen: Die Individuationsfrage lautet "Wieviele Objekte waren zu sehen?", die Identifikationsfrage wäre: "Was für Objekte waren zu sehen?" Im ersten Falle muss nur ein Merkmal individuiert werden, um sicherzustellen, dass es sich um ein neues Objekt handelt, so dass die Anzahl um eines erhöht werden kann. Zur Beantwortung der Frage kann von den Merkmalen abgesehen werden, es ist nur die Anzahl zu nennen. Im zweiten Falle jedoch müssen die Merkmale erinnert werden, um sagen zu können, welche Objekte gesehen wurden.

Die Unterscheidung zwischen Merkmals-Entdeckung und Merkmals-Identifikation trafen auch Sagi & Julesz (1985a,b). Aus einer Menge von linksorientierten Diagonalen konnte eine bestimmte Anzahl von rechts orientierten Diagonalen per Subitizing erfaßt werden (Entdeckung durch ein abweichendes Merkmal). Sollte jedoch diskriminiert werden, ob sich die Zielitems auch voneinander unterscheiden (als Zielitems inmitten linksorientierter Diagonalen wurden horizontal und waagrecht orientierte Linien verwendet), dann war die Verarbeitungszeit erheblich länger als im ersten Falle (Diskrimination unterschiedlicher Merkmale). Sagi & Julesz schließen daraus, dass Zielindividuation und -identifikation auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen. Subitizing wäre daher kein Zählvorgang, sondern Resultat einer Objektindividuation, die im visuellen System simultan durch Zuweisung einer begrenzten Anzahl von Zeigern zu Objekten vorgenommen wird.

Leslie et al. (1998) weisen darauf hin, dass sich diese unterschiedlichen Mechanismen auch bei Säuglingen finden lassen. Dafür sprechen Studien, die sich mit der Frage der Unterscheidung zwischen numerischer und qualitativer Identität befassten. Numerische Identität liegt vor, wenn ein Objekt als dasselbe wiedererkannt wird. Qualitative Identität bedeutet, dass trotz Merkmalsgleichheit und gleichen Aussehens auf das Vorliegen von zwei Objekten geschlossen werden muss. Die Repräsentation beider Identitätsarten bei Säuglingen und Kleinkindern im Alter zwischen 10 bis 12 Monaten wird durch die "Split-screen"- Technik nachgewiesen: Der Säugling sitzt vor zwei Schirmen, die durch eine sichtbare Lücke voneinander getrennt sind; in Blickrichtung des Säuglings links Schirm A und rechts Schirm B. Auf diese Weise wird es möglich, zu prüfen, ob die Säuglinge von einem Objekt ausgehen, wenn sie dieses z.B. von links kommend mit jeweils gleicher Geschwindigkeit und Richtung hinter dem linken Schirm verschwinden sahen, in der Lücke und dann rechts vom rechten Schirm auftauchen sahen. Auf gleiche Weise kann geprüft werden, ob die Säuglinge von zwei Objekten ausgehen, wenn sie z.B. ein Objekt von links kommend hinter dem linken Schirm verschwinden und dann eine passende Zeit später ein gleichaussehendes Objekt rechts vom rechten Schirm auftauchen sehen, ohne dass in der Lücke ein Objekt sichtbar war.

Spelke und Kestenbaum (1986) testeten mit dieser Technik den Effekt der raum-zeitlichen Kontinuität auf die Objektindividuation. Eine Gruppe I von Säuglingen wurde damit familiarisiert, dass sie ein stabförmiges Objekt sahen, welches sich von links nach rechts bewegte, wobei es zunächst hinter einem Schirm A verschwand, dann wieder sichtbar war, dann hinter einem Schirm B verschwand und rechts von diesem wieder sichtbar wurde. Eine zweite Gruppe Säuglinge (II) sah ebenfalls die so angeordneten Schirme A und B in der Familiarisierungsphase. Zunächst bewegte sich das gleiche Objekt von links kommend hinter Schirm A, dann tauchte ein gleich aussehendes Objekt rechts von Schirm B auf. In der Testphase sahen die Babys beider Gruppen folgende zwei Displays: In Display 1 ein stabförmiges Objekt, das sich hin und her bewegte; in Display 2 zwei solche sich hin und her bewegende Objekte. Die Babys der Gruppe I schauten länger auf das Testdisplay 2, die Babys der

Gruppe II länger auf Testdisplay 1. Die Babys der Gruppe I nahmen vermutlich nur ein Objekt wahr, das zweimal verdeckt wurde, wohingegen die Babys der Gruppe II zwei Objekte wahrnahmen. Nach der Indexing-Theorie wurde im ersten Falle nur ein Index zugewiesen, so dass das indizierte Objekt als numerisch identisch interpretiert wird, wohingegen im zweiten Falle zwei Indizes zugewiesen und folglich zwei Objekte individuiert werden.

Ähnlich realisierten Xu & Carey (1996) ihren Versuch. Sie zeigten Babys zwei durch eine Lücke getrennte Schirme, an deren äußersten linken und rechten Kante sich Objekte heraus- und wieder hinter den Schirm bewegten. In der Familiarisierungsphase realisierten sie zwei Basisvariationen: In der ersten räumlichen Bedingung kamen die beiden Objekte gleichzeitig hinter den Schirmen hervor und bewegten sich gleichzeitig zurück. In der zeitlichen Bedingung kamen die Objekte abwechselnd hervor, wobei immer nur ein Objekt sichtbar war. Wichtig war, dass die beiden Objekte unterschiedlichen Objektklassen angehörten, z.B. ein Schuh und eine Tasse: Die Objektidentität wurde also durch unterschiedliche Merkmale hergestellt. In der Testphase wurden die Schirme entfernt, wobei entweder eines oder beide zuvor gezeigten Objekte zu sehen waren. In der räumlichen Bedingung blickten 10 Monate alte Säuglinge länger, wenn ein Objekt zu sehen war, wohingegen sie in der zeitlichen Bedingung sowohl ein Objekt als auch zwei Objekte gleich lange anblickten. Es scheint so, dass sie die Verschiedenheit von Schuh und Tasse solange nicht erkennen, solange sie nicht beide Objekte zusammen sehen. Dies traf für 12 Monate alte Babys nicht zu. Die jüngeren Babys individuierten also Objekte durch die Lokation und nicht durch Merkmale: Waren zwei Objekte gleichzeitig zu sehen, dann wurden zwei Indizes vergeben, war nur ein Objekt zu sehen, dann wurde nur ein Index zugewiesen. Erst mit 12 Monaten scheint das "Wo"- mit dem "Was-System" integriert zu werden. Bevor Säuglinge also spezifische Objekte über die Merkmalsindividuation erkennen, z.B. einen Ball als Ball, erkennen sie Objekte als identische über die Lokationsindividuation.

Da die Lokationsindividuation über das Zuweisen von mentalen Zeigern erfolgt, kann die Indexing-Hypothese auch die Sensitivität der Säuglinge für die Änderung kleiner Anzahlen erklären. Beispielsweise fanden Simon et al. (1995), dass 5 Monate alte Säuglinge mehr über die Veränderung einer kleinen Numerosität überrascht waren als über die Veränderung der Objektart. Daher erfüllen die mentalen Zeiger die Bedingung der Abstraktheit, d.h. sie indizieren beliebige, individuierbare Objekte.

Indexing und die auditive Modalität

Die Indexing-Hypothese ist geeignet, Subitizing im Bereich der visuellen Modalität zu erklären, denn sie bezieht sich auf die Indizierung räumlich simultan präsentierter Objekte. Das Zuweisen der mentalen Zeiger erfolgt innerhalb einer bestimmten Verarbeitungsepoche, deren Dauer nicht genau spezifiziert wird. Analog zum Zeigen mit der Hand können auch Objekte nacheinander indiziert werden. (vgl. Ballard et al. (1997)). Die Zeiger werden also relativ schnell deaktiviert, wenn das individuierte Objekt identifiziert wurde. Die mentalen Zeiger lösen also das Variablenbindungs-Problem: sind weitere Merkmale an das Objekt gebunden, ist der Zeiger frei. Allerdings wurde die Indexing-Hypothese nicht auf die Variablenbindung im Bereich der auditiven Modalität angewandt. Man kann den Sinn eines gesprochenen Satzes verstehen, weil der Lautstrom regelhaft segmentiert und gebunden wird. Auch das Erkennen von Melodien oder Rhythmen kann mit der Variablenbindung in Zusammenhang gebracht werden. Schon Säuglinge können die phonetischen Eigenschaften von Konsonanten (Hillenbrand, 1984) und Vokalen (Kuhl, 1992) kategorisieren. Daneben wurde eine Reihe

anderer kategorisierungs- und musterbildungsrelevanter Eigenschaften untersucht wie Tonhöhe, Lautstärke, zeitliche Interpunktion, Rhythmus und melodische Kontur (z.B. Demany, 1982; Trehub, Thorpe, & Morrongiello, 1987; Morrongiello, 1988; Trehub & Thorpe, 1989).

Im Gegensatz zur visuellen Modalität wurde bei der auditiven Modalität die Frage nach der Diskrimination von Tonanzahlen nicht gestellt: Die Anzahl spielt allenfalls eine indirekte Rolle im Zusammenhang mit der Frage nach der Unterscheidbarkeit auditiver Muster und Gruppen. Meist werden Tongruppen untersucht, die nur wenige Töne umfassen; Trehub & Thorpe (1989) fanden, dass 7 bis 9 Monate alte Säuglinge rhythmisch unterschiedlich strukturierte Dreier- (X XX) vs (XX X) und Vierer-Tonsequenzen (XX XX) vs (XXX X) unterscheiden können. Auch konnten sie kontrastierende Tempi bei Tonhöhenvariationen diskriminieren (vgl. Morrongiello, 1986).

Unter dem Stichwort "temporal numerosity" beschäftigten sich einige wenige Studien mit dem Zählen rhythmisch ungruppiertes Töne durch Erwachsene (z.B. Taubman, 1950; Garner, 1951; Cheatham & White, 1954; White, 1963; Lechelt, 1975). Diese Studien ergaben, dass die Genauigkeit der Enumeration nicht nur eine Funktion der Anzahl der Töne, sondern auch der Präsentationsrate ist. Allerdings sind die Ergebnisse nicht so einfach zu interpretieren, da unterschiedliche Tondauern und Intertonintervalle verwendet wurden. Taubman (1950), Garner (1951) und auch Cheatham & White (1954) fanden einen deutlichen Rückgang der Zählgenauigkeit ab 5 Tönen. Legt man einen Genauigkeitsmaßstab von 80% und mehr an, werden nur bis zu 3 Töne mit hoher Genauigkeit enumeriert. Die maximale Rate, bei der kleine auditive Numerositäten noch ohne größeren Genauigkeitsverlust enumeriert werden können, scheint bei 10 pro Sekunde zu liegen (Garner, 1951; Cheatham & White, 1954; White, 1963). Da es sich bei dieser Rate nicht um eine sinnesspezifische handelt, wurde über einen zentralen amodalen Rhythmus spekuliert (White, 1963), wobei es neurophysiologische Hinweise auf einen kortikalen Kodierungsmechanismus für kleine Anzahlen gibt (Thompson et al., 1970). Massaro (1976) erwähnt, dass die höchste Rate subvokalen Sprechens bei 6 Silben pro Sekunde liege. Zusammengefasst legen diese Befunde nahe, dass bei höherer Präsentationsfrequenz die relativ fehlerfreie Enumeration durch Erwachsene auf eine kleine Numerosität im Bereich 3 bis 4 beschränkt ist. Dies stimmt mit den Befunden aus dem Bereich des visuellen Subitizing gut überein. Die Resultate der Experimente 6 bis 9 passen in dieses Befundmuster.

Indexing und amodale Zählermodelle

An dieser Stelle kann man sich fragen, inwieweit die Vergleichbarkeit der visuellen und auditiven Modalität den Schluss auf ein amodales Zählermodell zulässt. Nimmt man an, dass die Erfassung kleiner Numerositäten nicht das Resultat eines Zählermechanismus ist, sondern ein "Nebenprodukt" der Objekt- bzw. Ereignissegmentation, kann man folgern, dass Bindung und Segmentierung von Objekten und Ereignissen modalitätsspezifisch erfolgt. Erst auf einer amodalen Ebene der Integration kann intermodal gebunden werden.

Gallistel & Gelman (1992) schlugen mit dem Zähler-Akkumulator-Modell einen präverbalen Mengenerfassungsmechanismus vor, der besonders gut zur temporalen Anzahldiskrimination geeignet erscheint. Das FINST-Modell ist ein rein digitales Modell, da die Anzahl der Stimuli durch die Anzahl der gebundenen Zeiger festgestellt wird. Die Variabilität in den Subitizing - Daten kommt dadurch zustande, dass die Anzahl freier Zeiger in gewissen Grenzen variiert oder das Auslesen der Anzahl gebundener Zeiger Aufmerksamkeitsschwankungen unterliegt. Das Zähler-Akkumulator-Modell hingegen ist ein Mischmodell, das aus einer digitalen und einer analogen Komponente besteht. Der

Zähler entspricht den on-off-Zuständen des Schalters, die analoge Komponente dem Füllungszustand des Akkumulators. Die Erfassung einer Numerosität wird analog in eine Quantität transformiert, da der Akkumulator während der Schließung des Schalters durch den Schrittmacher (eventuell ein zentraler cerebraler Rhythmus) "geladen" wird. Dieses Zähler-Akkumulator-System funktioniert deswegen nur bei kleineren Numerositäten relativ genau und fehlerarm, weil mit zunehmendem Füllungszustand des Akkumulators die Varianz immer größer wird. Diese Eigenschaft des Systems erlaubt die Anwendung des Weber-Fechner-Gesetzes auf die Anzahl-Diskrimination, da es die skalare Varianzeigenschaft realisiert: Je größer die zu vergleichenden Diskriminanda sind, desto größer muss deren absolute Differenz werden.

Das Zähler-Akkumulator-Modell stimmt weiterhin mit Befunden aus der mentalen Arithmetik überein, die eine analog-quantitative Anzahlrepräsentation indizieren; so z.B. der Distanz-Effekt (z.B. Dehaene, 1989): Sowohl bei einstelligen als auch bei zweistelligen Zahlen nimmt die Reaktionslatenz mit zunehmendem Abstand zwischen den Diskriminanda (meist eine Vergleichszahl und eine fixe Standardzahl) ab. Dieser Effekt wurde bei vielen Diskriminationsaufgaben mit quantitativen Diskriminanda gefunden (z.B. Länge, Höhe, Volumen, aber auch größere Anzahlen). Dehaene (1992) geht daher in seinem Triple-Code-Modell davon aus, dass Zahlen als unterschiedlich lange Abschnitte auf einem mentalen Zahlenstrahl angeordnet sind, wobei mit größer werdender Zahl der Abschnitt immer kleiner wird und sehr große Zahlen quantitativ nicht mehr vorstellbar sind (vgl. Dehaene, 1997), so dass von einer logarithmischen Stufung des mentalen Zahlenstrahls ausgegangen werden kann.

Dehaene & Changeux (1993) konstruierten ein neuronales Netzwerk, das kleine Numerositäten auditiv und visuell erkennen sowie zwei kleine Numerositäten diskriminieren konnte. Dieses Netz konnte sowohl visuelle als auch auditive Numerositäten erkennen, in dem der visuelle und der auditive Output einer amodalen Summationseinheit zugeführt wurde, welche in einen Numerositätsdektektor mündete. Dehaene & Changeux weisen auf die Begrenztheit dieses Modelles hin und schlagen vor, dass der Output der auditiven und der visuellen Modalität in einen amodalen 'object file' erfolgen sollte, dessen Inhalt zur Numerositätsbestimmung dienen könnte. Modellhaft kann man das FINST-Modell und das Zähler-Akkumulator-Modell verknüpfen, wenn man den Akkumulator als einen analogen 'object file' konzipiert und den Schalter nicht nur bei einem Tonereignis öffnet, sondern auch dann, wenn ein mentaler Zeiger an ein Objekt gebunden wird. Die Aktivierungsenergie eines Tonereignisses oder einer Zeigeaktivität kann in eine proportionale Öffnungsdauer bzw. Öffnungs-Schließungs-Frequenz umgesetzt werden. Für ein solches Modell, so Dehaene & Changeux, gäbe es auch neurobiologische Evidenzen.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass Studien mit Akalkulie-Patienten ebenfalls dafür sprechen, im Subitizing einen eigenständigen Prozess zu sehen, der eine andere repräsentationale Grundlage hat als Zählen. Diese Patienten konnten von Numerositäten, die 1 bis 6 zufällig angeordnete Punkte umfassten, 1 bis 3 fehlerfrei benennen, darüber hinaus schnellte die Fehlerzahl bei einigen Patienten auf fast 100%. Die Patienten, die Dehaene & Cohen (1994) untersuchten, litten an Simultanagnosie, d.h. sie zeigten bedingt durch die Unfähigkeit, Objektlokationen räumlich zu markieren, ein generelles Defizit bei seriellen visuellen Explorationsaufgaben. Dass kleine Numerositäten von diesem Defizit ausgenommen sind, interpretieren Dehaene & Cohen (1994) als Beleg dafür, dass Subitizing ein parallel ablaufender Prozess ist.

5. 2. 2 Subitizing und Zählen

Subitizing ist das Resultat paralleler perceptiver und Verarbeitungsprozesse, deren Funktion in der Individuation perceptiver Einheiten besteht. Diese Bildung perceptiver Einheiten ist eine wesentliche Voraussetzung, nicht das Resultat des Zählens. Subitizing kann kein Zählen sein, wenn man sich nochmals die semantischen Eigenschaften des Zählens vergegenwärtigt. Unter Zählen versteht man eine Weise des Handelns, durch die die Anzahl einer Menge bestimmt wird und durch das man auf die Frage, wieviele x es denn sind, ein Zahlwort nennen kann. (Grote, 1983). Zählen setzt distinkte Einheiten voraus, worauf besonders Steffe, v. Glasersfeld, Richards & Cobb (1983) verweisen. Es gibt zahlreiche Arten von Einheiten, die sich am einfachsten in konkret - wahrnehmbare und abstrakt - gedankliche unterteilen lassen. Prototypisch ist das Abzählen einer Reihe von Gegenständen auf einem Tisch mit dem Zeigefinger: Man berührt nacheinander die Gegenstände und nennt dazu jeweils ein Zahlwort in der Abfolge der Zählreihe. Oder man hört die Glockenschläge von einem Kirchturm und streckt für jeden gehörten Ton einen weiteren Finger aus. Von besonderen Eigenschaften des Wahrgenommenen wird abgesehen, sie werden als Zähleinheiten genommen, denen jeweils ein Finger oder ein Zahlwort zugeordnet werden kann. Damit wird deutlich, dass der Begriff der Zählbarkeit zwei Klassen distinkter Einheiten impliziert: Einheiten, die gezählt werden und Einheiten, mit denen gezählt wird. Das Zählen macht eine Ko-ordination beider Klassen erforderlich, die ein-eindeutig aufeinander abgebildet werden. Durch das Zuordnen werden die zu Zählenden in durch Zahlindizes markierte und nicht markierte getrennt und unterschieden. Sind alle zu zählenden Einheiten markiert, können die Zählmarken mit den gezählten Einheiten auf Gleichmächtigkeit hin geprüft werden. Ein solchen Zählvorgang würden wir nicht als Zählen bezeichnen, da er keine Antwort auf die Frage nach dem Wieviel liefert. Daher ist auch Subitizing kein Zählen, da nur ein Vergleich zwischen gebundenen und freien "Zählmarken" (Indizes) stattfindet. Auch eine stabile Abfolge von zum Zählen angeblich geeigneten Marken, wie sie Gelman & Gallistel (1978) in ihrem Numeron-Modell postulieren, kann nicht zum Bestimmen der Kardinalität einer Menge dienen, sondern allenfalls zur Bestimmung von Mächtigkeitsäquivalenzen, so dass man nicht von einem Zählmodell sprechen kann. Subitizing ist also ein perceptives Analogon zum Mengenbestimmen mit einer Hilfsmenge (Ifrah, 1991).

Die Äquivalenzrelation lässt die markierten Einheiten der Menge unterbestimmt, da die Relationen zwischen diesen Einheiten unberücksichtigt bleiben. Erst eine Ordnungsrelation wie "kleiner als" ermöglicht es, der Menge eine Struktur zu verleihen. Wenn "kleiner als" nicht anwendbar ist, z.B. weil die Einheiten gleich gross sind, dann lassen sich andere, abstraktere Ordnungsrelationen verwenden, beispielsweise logische Diagramme in Form von Kreisen, die um jede zu zählende Einheit neu gezogen werden müssen und dabei die schon umkreisten Einheiten mit enthalten müssen. Die so über die asymmetrische Relation "ist enthalten in" geordnete Menge ist durch den zuletzt gezogenen Kreis eine Einheit, deren Benennung durch eine Kardinalzahl zum Ausdruck gebracht wird. Diese steht jedoch in logischer Beziehung zu den Untereinheiten der Menge, aber auch zu anderen Mengen, in denen sie enthalten ist. Diese Relationen sind für die Zählzeichen der Zahlen (Numerlogs) in Form der Peano-Axiome festgelegt oder in bestimmten Mengentheorien begründet worden (Schmidt, 1966).

Ohne die Verwendung von Zählzeichen, die diesen logisch-arithmetischen Prinzipien entsprechen, kann nicht von Zählen gesprochen werden. Zählen ist folglich nicht auf einen Zahlaspekt wie Kardinalität reduzierbar. Das Unterscheiden von Mengen diskreter Objekte oder Ereignisse nach gleichviel oder unterschiedlich viel bzw. mehr oder weniger ist eine Voraussetzung des Zählens, aber diesem nicht gleichzusetzen. Die Zählprinzipien nach Gelman & Gallistel (1978) beschreiben das

Zählen nur unvollständig, da das Prinzip der stabilen Abfolge weder den ordinalen noch den operativen Zahlaspekt umfasst. Des Weiteren fehlt die Nachfolgerrelation und deren Verallgemeinerbarkeit auf beliebige Zahlen, wie dies durch die vollständige Induktion im Peano-Axiom 5 sichergestellt ist. Letztlich ist nur das Eins-zu-Eins-Prinzip klar formuliert, das aber nur Gleich- oder Ungleichmächtigkeitsbestimmungen von Mengen erlaubt.

Zählen setzt jedoch den Zahlbegriff voraus und damit eine Repräsentation höherer Ordnung, wie sie durch die Sprache ermöglicht wird (Damerow, 1994), oder nach Piaget (1985) einen Prozess der reflexiven Abstraktion. Piaget (1972) zufolge impliziert die Kenntnis gleicher Mächtigkeiten nicht den Begriff der Zahl, da die Zahl eine Synthese aus ordinalem und kardinalem Zahlaspekt ist und daher eine präoperatorische numerische Kompetenz. Das Diskriminieren von Mengen, das die Bestimmung von Mächtigkeitsäquivalenzen impliziert, basiert jedoch nicht auf sprachlichen Repräsentationen, sondern auf perzeptiv-analogen. Insofern werden auch keine Zahlen wahrgenommen, sondern Mengen. Die in der Literatur häufig zu findende Gleichsetzung von "Repräsentation einer Zahl" und "Repräsentation einer Numerosität" dürfte wohl damit zusammenhängen, dass letztere ebenfalls abstrakt ist und zahlreiche Eigenschaften der Objekte oder Ereignisse nicht berücksichtigt. Die Rede vom Zahlensinn, die Dehaene (1997) wohl von Dantzig (1954) übernommen hat, fördert dieses Missverständnis, obwohl Dantzig, aber auch Ifrah (1991) und Menninger (1979) durch die Verwendung des Ausdrucks "Zahlensinn" hervorheben, dass es sich um die genaue, wahrnehmungsmäßige Erfassung einer kleinen Anzahl handelt, die mit Zählen nichts zu tun hat. Strenggenommen handelt es sich beim Zahlensinn um die Wahrnehmung von Mengen, also von Quantitäten. Menninger (1979) und Ifrah (1991) belegen dies dadurch, dass früher viele Kulturen nur für kleine Mengen bis 4 oder 5 Zahlworte bildeten und verwendeten. Damerow (1994) verweist außerdem auf Kulturen, die überhaupt keine Numeralia in Verwendung hatten. Das Zählen ist vielmehr eine von konkreten Hilfsmengen ausgehende historisch entwickelte Symbolbildung, die stellvertretend für die zu zählenden Objekte arithmetische Operationen wie Vermehren oder Vermindern erlaubte. Dies war zunächst anhand gegenständlicher Hilfsmengen wie Rechensteine erfolgt, was Damerow als konkrete Repräsentation oder Repräsentation erster Ordnung bezeichnet. Menninger (1979) stellt dar, dass die Hände bzw. Körperteile wohl die erste gegenständliche Hilfsmenge waren, an denen stellvertretend solche Operationen durchgeführt wurden. Die symbolische Zahl ist aber dasjenige, womit im Akt des Zählens die Numerosität begrifflich bestimmt wird. Dieser Vorgang impliziert eine Reihe logischer Relationen, die nichts mit der Anzahldiskrimination zu tun haben. Diese Kompetenz zum Diskriminieren von Numerositäten haben zahlreiche Tiere (Davis & Pérusse, 1988), denen jedoch keineswegs die Kompetenz zu Zählen zugeschrieben wird (Thomas & Lorden, 1993). Thomas & Lorden schlagen vor, das Diskriminieren und Abgleichen von Mächtigkeiten als ein Fall des "prototype matching" zu konzipieren, das gut mit der Indexing-Hypothese übereinstimmt. Säuglinge haben ebenfalls die Kompetenz zur Diskrimination von Numerositäten, und erwerben normalerweise auch die Zählkompetenz. Damerow (1994) hebt verbunden mit der historischen Genese des Zahlbegriffs hervor, dass es präarithmetische Kulturen gab, die nicht über die Bestimmung von Mächtigkeitsäquivalenzen hinausgingen. Das Konzept der Zahl und das damit verbundene Zählen sowie die mathematisch-logische Begründung einer Zahlentheorie haben sich in unterschiedlichen Kulturen unterschiedlich entwickelt. Das Konzept der Zahl lässt sich nicht entwicklungsbiologisch bzw. entwicklungspsychologisch auf die Anzahldiskrimination reduzieren.

5. 3 Entwicklungspsychologische Diskussion

Es war festzustellen, dass Subitizing ein Prozess der wahrnehmenden Erfassung kleiner Mengen ist, der nicht als numerische Kompetenz im Sinne des Zählens verstanden werden kann. Es handelt sich um einen averbalen, auf kleine Numerositäten beschränkten, non-numerischen Mechanismus. Subitizing ist ein non-numerischer Mechanismus. Folglich kann die Tatsache, dass Säuglinge kleine Numerositäten diskriminieren, nicht als angeborene Zählkompetenz betrachtet werden.

Fragestellungen zur Entwicklung der Zählkompetenz müssen daher von jenen frühen Verhaltensweisen ausgehen, die das Unterscheiden von Anzahlen beim Säugling bzw. Kleinkind kennzeichnen. Diese Verhaltensweise wird als Kompetenz A aufgefasst, die sich zu einer Kompetenz B verändert. Bedeutsam ist die Festlegung, welche Performanzen welche Kompetenzen indizieren. Sehr häufig orientiert sich die Entwicklungspsychologie bei der Antwort auf die Frage nach dem Entwicklungspfad von A nach B "rückwärts". Die Kompetenz B wird als Ziel bzw. Norm der Entwicklung aufgefasst und in die Frage, ob der Organismus B "schon" kann, transformiert und nach B vergleichbaren Vorläufer-kompetenzen A gesucht. Dies ist zwar heuristisch sinnvoll, kann aber auch dazu führen, dass B-ähnliche Verhaltensweisen fälschlich als zu B gehörig interpretiert werden. Bei nur quantitativ unterschiedlichen Kompetenzen ist diese Strategie angemessen, auch wenn beispielsweise von einer Anreicherung von Kernwissen ausgegangen wird (Carey, 1991). Im Falle qualitativer Veränderungen, wie sie beispielsweise Piaget (1948) postulierte, kann diese Strategie zu einem unangemessenen Verständnis äußerlich ähnlicher Verhaltensweisen führen. Daher sollte die "Rückwärts-Strategie" stets mit einer "Vorwärts-Strategie" verknüpft werden: Man wird die Entwicklung von A nach B ohne ein adäquates Verständnis von A nicht interpretieren und nicht fördern können.

In der numerischen Domäne werden beispielsweise die Befunde aus den Studien zur Anzahldiskrimination bei Säuglingen als Hinweis auf angeborene numerische Kompetenzen interpretiert. Sie entsprechen weitgehend den durch die Zählprinzipien von Gelman & Gallistel (1978) beschriebenen Kompetenzen und bilden einen Kernbereich der entwickelten numerischen Kompetenz. Diese Interpretation deckt sich mit einer Theorie der Zahlbegriffsentwicklung, die als *principles first*-Ansatz bezeichnet wird (Baroody, 1992). Dieser nativistische Ansatz geht davon aus, dass der Erwerb von Zählfertigkeiten auf domänenspezifischen, angeborenen Grundlagen beruht.

Einen entgegengesetzten Standpunkt vertritt beispielsweise Simon (1997), der für Subitizing einen non-numerischen Erklärungsansatz vorschlägt, der sich weitgehend mit den Schlussfolgerungen der vorne berichteten Studien deckt. Die Befunde aus der Säuglingsforschung belegen eine Kompetenz, die sich als "Wahrnehmungssinn für Anzahlen" beschreiben lässt. Simon wiederholt die Auffassung Piagets und anderer Forscher (z.B. Dantzig, 1954), dass Zählen das Verständnis von ordinalem und kardinalen Zahlaspekt voraussetzt. Die Anzahlwahrnehmung lässt sich hingegen als pränumerische Kompetenz kennzeichnen. Diese Position entspricht dem empiristischen *principle after*-Modell (z.B. Fuson, 1988b), welches davon ausgeht, dass die Zählprinzipien durch reflektierende Abstraktion gewonnen werden, nachdem das Kind durch Imitation, Beobachtung und Belehrung die Zählroutinen sowie die Bedeutung der Numeralia beim Zählen gelernt hat.

5. 3. 1 “Numerisches Wissen” bei Säuglingen: Numerische oder prä-numerische Kompetenz?

Da die Beantwortung der Frage nach der Entwicklung des Zählens und des Zahlbegriffes wesentlich davon abhängt, wie die Startkompetenzen bei Säuglingen konzeptualisiert werden, wird im folgenden der Ansatz der numerischen Kompetenz mit demjenigen der prä-numerischen Kompetenz kontrastiert.

- Numerische Kompetenz

Charakteristisch ist die Sichtweise von Wynn (1995), die feststellt: Infants “have a means of determining and representing number per se. Furthermore, infants are able to reason numerically about these representations; they possess procedures for operating over these representations in numerically meaningful ways, and so can appreciate the numerical relationships that hold between numerical quantities. They can thus be said to possess a genuine system of numerical knowledge. These early capacities suggest the existence of an unlearned basic core of numerical competence” (S. 35). Diese Sichtweise impliziert auch, dass Säuglinge über Repräsentationen des ordinalen und kardinalen Zahlenaspektes verfügen.

Im Wesentlichen stellt Wynn drei Behauptungen auf: (1) Säuglinge unterscheiden Mengen nicht aufgrund perceptiver Eigenschaften, sondern aufgrund der Anzahl, d.h. aufgrund des numerischen Wertes einer Menge von Objekten. (2) Diese enumerative Fähigkeit ist allgemeiner Natur, da sie auf die unterschiedlichsten Entitäten angewandt werden kann. (3) Säuglinge verstehen die ordinalen Relationen zwischen den Numerositäten, die sie enumerieren können.

Zu (1): Sind Säuglinge sensitiv für die Anzahl einer Menge?

Die Behauptung, dass Säuglinge von den perceptiven Eigenschaften von Entitäten absehen und nur auf die abstrakte Anzahl achten, sieht Wynn durch die Studien belegt, denen zufolge Säuglinge kleine Mengen von Objekten voneinander unterscheiden. Diese Diskriminationen werden nur für kleine Objektmengen nachgewiesen. Wynn versucht das Argument, es handele sich um Subitizing, dadurch zu widerlegen, dass sie Subitizing mit einem Mustererkennungsprozess gleichsetzt und auf Studien verweist, die zeigen, dass Säuglinge auch heterogene Objektmengen und kreuzmodal enumerierten (Starkey, Spelke, & Gelman, 1990). Säuglinge achteten demzufolge nicht auf Muster, sondern bestimmten die Anzahl. Da die Anzahlerfassung also kein Subitizing ist tendiert Wynn (1992a) zur Schlussfolgerung, dass Säuglinge auch die Semantik der Anzahl verstünden, z.B. auch den numerischen Unterschied zwischen “zwei” und “drei”. Subitizing ist jedoch kein Mustererkennungsprozess (vgl. Kap. 3), so dass die Enumeration kleiner Anzahlen im Rahmen des diesem zugrunde gelegten Indexing-Modells erklärt werden kann. Folglich ist auch der Schluss auf ein konzeptuelles Anzahlverständnis nicht zwingend. Es reicht aus anzunehmen, dass die Säuglinge einen Eins-zu-Eins-Abgleich zweier kleiner Mengen durchführen, um diese zu unterscheiden.

(2) Haben Säuglinge eine allgemeine enumerative Fähigkeit?

Wynn (1995) argumentiert für eine allgemeine enumerative Fähigkeit bei Säuglingen, da Säuglinge nicht nur Objekte, sondern auch Sequenzen von Ereignissen diskriminieren können. Im Mittel 6 Monate alte Säuglinge wurden an 2 oder 3 Sprünge einer Puppe habituier und sahen in der

Testphase entweder 2 oder 3 Sprünge, wobei sie im Falle einer neuen Anzahl dishabituieren. Sie unterscheiden also nicht nur diskrete, simultan gegebene Objekte oder diskrete Ereignisse wie Klänge, sondern auch diskrete Verbundereignisse. Allerdings erscheint die Unterscheidung zwischen diskreten und Verbundereignissen etwas willkürlich angesichts der Tatsache, dass Säuglinge auch schon kleine Melodien oder Phonemketten unterscheiden (z.B. Demany, 1982). Auch diese Befunde müssen nicht unbedingt für eine generelle enumerative Kompetenz sprechen. Da es sich um kleine Numerositäten handelt, können auch diese Phänomene im Kontext der Indexing-Theorie erklärt werden, die die Individuation von perzeptiven Einheiten als eine grundlegende Funktion der Wahrnehmungssysteme ansieht. Die Bildung von Perzepten ist nur möglich, wenn innerhalb eines bestimmten Zeitfensters mehrere Einheiten zusammengefasst werden ("binding"). Im Falle einer kleinen Anzahl von Objekten oder Ereignissen wie "Sprung einer Puppe" genügt es, anzunehmen, dass Säuglinge einen Eins-zu-Eins-Abgleich, also eine kardinale Diskrimination (Dantzig, 1954) vornehmen können.

(3) Verstehen Säuglinge ordinale Relationen?

Wynn (1995) führt aus: Infants "possess an appreciation of the numerical relationships that hold between different small numbers" (S. 41). Diese Behauptung basiert auf einer Versuchstechnik, mit der eine Erwartungsverletzung bei Säuglingen mit einem mittleren Alter von 5 Monaten induziert wurde, indem das Auftauchen und Verschwinden einer kleinen Anzahl von Mickey-Mäusen hinter einem Schirm variiert wurde (Wynn, 1992a). Die Säuglinge sahen, wie eine Mickey-Maus-Puppe von einer Hand hinter einen Schirm auf der Bühne platziert wurde, die Hand wurde leer zurückbewegt, und danach wurde in gleicher Weise eine weitere Puppe hinter den Schirm gestellt (Additions-Bedingung). Nach dem Beseitigen des Schirmes konnten die Säuglinge ein mögliches und ein unmögliches Resultat sehen: Zwei Mäuse oder eine Maus. Das Maß der relativen Blickdauer indizierte, dass die Säuglinge beim unmöglichen Resultat bedeutsam länger schauten. Da Wynn (1995) in diesem Ergebnis keinen Beleg dafür sieht, dass die Säuglinge die Richtung der Veränderung vorhersehen, führte sie ein zweites Experiment durch, in welchem das unmögliche Ereignis aus 3 Mickey-Mäusen statt einer bestand. Wiederum schauten die Säuglinge bedeutsam länger, was Wynn als Beleg dafür interpretiert, dass die Säuglinge nicht nur eine Veränderung, sondern das exakte Ergebnis erwarteten. Dieses Ergebnis lässt sich jedoch nicht nur dadurch erklären, dass die Säuglinge ein ordinales Verständnis der Veränderung kleiner Objektkollektionen haben. Diskriminationen, die auf gleich-ungleich Kontrasten beruhen, genügen auch hier als Erklärung, wenn man annimmt, dass die Säuglinge sich die Mäusepuppen merken, die hinter den Schirm gestellt wurden. Bei kleinen Anzahlen könnten sich die Säuglinge sowohl eine Puppe, als auch zwei oder drei Puppen als Verbundobjekte merken ("Puppe", "Puppe Puppe", "Puppe Puppe Puppe"). Studien zur Objektpermanenz zeigten, dass Säuglinge überrascht sind, wenn ein Objekt ohne erkennbaren äußeren Einfluß anders aussieht als vorher (phänomenale Identität; Moore, Borton & Darby, 1978). Folglich reagieren die Säuglinge auch auf die Veränderungen einer kleinen Gruppe von Objekten überrascht, wenn sie die Gruppentransformation nicht sehen konnten. In dieser kleinen Gruppe von Objekten kann nach der Indexinghypothese jedes einzelne Objekt indiziert werden, so dass ein Eins-zu-Eins-Vergleich möglich ist, wenn eine neue kleine Objektgruppe gezeigt wird. Dieser Erklärungsansatz verzichtet auf die Annahmen, die Säuglinge würden die Richtung und numerische Differenz der Veränderung antizipieren und folglich ein Ordinalitätsverständnis besitzen.

- Prä-numerische Kompetenz

Dieser Ansatz geht davon aus, dass die numerischen Diskriminationsleistungen, die bei Säuglingen beobachtet wurden, ohne spezifische numerische Kompetenzen erklärt werden können. Die Anwendungen der Habituations-, Präferenz- und Lernmethoden in der Säuglingsforschung belegen, dass Säuglinge über ein Grundinventar von Wahrnehmungs- und Gedächtnisfunktionen verfügen, die relativ unspezifische Diskriminationen von "gleich" vs. "ungleich" in unterschiedlichsten Modalitäten und Domänen ermöglichen. Simon (1997) nennt vier Kompetenzbereiche, die er "minimal competencies required for 'non-numerical' account" nennt. Diese decken sich weitgehend mit denjenigen Kompetenzen, die in den Kap. 4.2.2 und 4.2.3 dargestellt wurden:

Zunächst die Kompetenz, die Simon "memory & comparison of perceived entities" nennt, auf der Erklärungen für Habituationsphänomene basieren (z.B. Cohen, 1991). Im Habituationsexperiment, das Säuglinge ab dem 5. Lebensmonat erfolgreich absolvieren, sind die Habituations- und Teststimuli nie zusammen sichtbar: Ab dem fünften Lebensmonat können Säuglinge in engem Zusammenspiel von Wahrnehmung, Gedächtnis und Aufmerksamkeit also sicher Perzepte bilden und diese mit der Umgebungsstimulation vergleichen.

Eine weitere Kompetenz nennt Simon "limited individuation and discrimination". Sie wurde unter allgemeinpsychologischen Gesichtspunkten bereits diskutiert. Unter Bedingungen, die Zählen deutlich erschweren, diskriminieren Säuglinge ebenso wie Erwachsene nur kleine Numerositäten bis 4 und große Numerositäten nur bei sehr großem Weber-Bruch. Daher kann von pre-counting subitizing und der Gültigkeit der Indexing-Hypothese auch für Säuglinge ausgegangen werden. Die perzeptiven Individuations- und Diskriminationsmechanismen bei Säuglingen scheinen also schon sehr früh wie bei Erwachsenen zu funktionieren. Ohne diese Mechanismen könnten keine größeren perzeptiven Einheiten gebildet werden, und ein Erkennen von Objekten und Anzahlen wäre unmöglich.

Die Kompetenz "abstract encoding / representation" hängt eng mit dem Indexing-Modell zusammen. Eine wesentliche Annahme des Indexing-Modells besteht darin, dass Objekte zunächst raum-zeitlich individuiert werden, dass das "Wo" und "Wann" dem "Was" vorausgeht. Unterschiedliche Entitäten werden durch Indizieren als distinkte Einheiten behandelt. Xu & Carey (1996) interpretieren ihre Befunde, dass Säuglinge erst ab einem Alter von 12 Monaten Merkmalsinformationen systematisch zur Objektindividuation verwenden mit ihrer "object first"-Hypothese. Diese etwas missverständliche Benennung soll aufzeigen, dass Säuglinge unter 12 Monaten Objekte nicht nach Merkmalen und Eigenschaften individuieren, z.B. ein Objekt als Schuh, sondern als unspezifisches Etwas. Plausibel ist dieses angesichts der Tatsache, dass erst ab dem 6. Lebensmonat die Sehschärfe voll ausgebildet ist und neben Bewegungen und größeren raum-zeitlichen Form-veränderungen von Objekten auch deren Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt wird (Kellman & Spelke, 1983).

Allerdings lassen die Befunde von Xu & Carey offen, ob Säuglinge merkmalsbasierte Identitätsinformationen nicht verwenden, weil sie darüber nicht verfügen oder sie nur eingeschränkt nutzen. Auf jeden Fall werden unterschiedliche Identitätsinformationen genutzt, um Objekte hinsichtlich Gleichheit oder Ungleichheit zu diskriminieren: Einerseits können sich Säuglinge an quantitativen Objektmerkmalen wie Höhe oder physikalischen wie Kontinuität orientieren (eigenschaftsbasierte qualitative Objektidentität), andererseits an deren Anzahl (numerische Identität) mit dem Spezialfall der Objektpermanenz.

Säuglinge nutzen in bestimmter Weise auch physikalische Eigenschaften von Objekten. Baillargeon (1987;1993) konnte zeigen, dass schon beinahe 5 Monate alte Säuglinge von folgender Präsentation überrascht zu sein scheinen: Sie sehen zunächst ein eben vor ihnen liegendes rechteckiges undurchsichtiges Brett, hinter dem sich in ihrer Sichtlinie befindend ein würfelförmiges Objekt befindet. Mit dem Brett werden zwei Arten von Rotationsbewegungen ausgeführt, wobei sich die dem Baby näherliegende Kante erhebt, der Schirm also um die dem Würfel näher liegende fixierte Kante auf den Würfel zu rotiert wird. Ab einem Winkel von ca. 80° kann das Baby den Würfel nicht mehr sehen. Im physikalisch möglichen Falle beendet der Würfel die Rotationsbewegung bei 112° , im physikalisch unmöglichen Falle führt das Brett eine vollständige 180° Rotation aus, so, als ob es den Würfel verschwinden lassen könnte. Da die Babys über dieses unmögliche Ereignis überrascht scheinen, da sie dishabituieren, scheinen sie aufgrund der physikalischen Eigenschaft "Starrheit" numerische Objektidentität zu erwarten. Ähnlich verhält es sich mit der Objekteigenschaft "Höhe": Baillargeon & Graber (1987) zeigten 3 Monaten und 5 Tage alten Säuglingen einen Spielzeughasen, der sich von links nach rechts hinter einen Schirm bewegte, in dessen Mitte eine Aussparung so eingepasst war, dass der Kopf des Hasen gesehen werden konnte. Vergleichbar lange blickten sie, wenn sie einen kleinen Hasen hinter den Schirm gehen sahen, der eine niedrigere Höhe als die Aussparung hatte und dessen Kopf folglich nicht zu sehen war. Sie blickten jedoch deutlich länger, präsentierte man ihnen einen langen Hasen, dessen Kopf aber in der Aussparung nicht zu sehen war. Diese Befunde zeigen zweierlei: Zum ersten können schon sehr kleine Säuglinge Objekte als konstant interpretieren, auch wenn sie kurzzeitig aus dem Gesichtsfeld verschwinden und wieder auftauchen. Dieser Art der Objektpermanenz entspricht die numerische Identität, wie die Befunde von Xu & Carey (1996) (ähnlich auch bei Uller, Carey, Huntley-Fenner, & Klatt, 1999) zeigen, denn logisch gesehen können zwei Objekte im Spiel sein: links vom Schirm verschwindet Objekt A und rechts vom Schirm taucht Objekt B auf. Doch kleinere Babies erwarten, solange sie nicht gleichzeitig zwei sehen, nur ein Objekt, selbst dann, wenn das Objekt seine Klassenzugehörigkeit wechselt, z.B. links ein Schuh hinter den Schirm wandert und rechts ein Würfel herauskommt. Sie erkennen also nur eingeschränkt eine qualitative Objektidentität, die darin besteht, dass zwei Objekte zur gleichen Klasse gehören (sogenannte "sortals"). Zum zweiten zeigen diese Befunde deutlich, dass es sehr von der Aufgabe abhängt, ob Babys Objekte eher nach Eigenschaften oder eher nach Lokation individuieren. Die Studien zur Objektpermanenz induzieren systematisch bestimmte Erwartungen, indem den Babys in der Familiarisierungsphase die gleich bleibenden Verhältnisse beispielsweise zwischen Objekt, Bewegung und verdeckendem Schirm mehrfach gezeigt werden. Dadurch werden nicht nur die raumzeitlichen Verhältnisse, sondern auch spezifische Objektmerkmale salient gemacht. Zahlreiche Studien zeigten, dass Säuglinge unterschiedlich saliente Informationsquellen für einfache Kategorisierungsleistungen nutzen können (Bornstein, 1984). Dieses Objektrepräsentationssystem, in dem das "wo-System" das "was-System" zwar dominiert, letzteres aber elementare Merkmals-kategorisierungen ermöglicht, ist ausreichend, um die numerischen Diskriminationsleistungen von Säuglingen zu erklären. Auf die Annahme eines reichhaltigen semantischen numerischen Wissens kann daher verzichtet werden.

Studien zur Objektpermanenz (Baillargeon, 1993, 1995; Spelke, et al., 1992) liefern Hinweise darauf, dass Säuglinge schon ab dem 5. Lebensmonat elementare physikalische Eigenschaften und Regelmäßigkeiten physikalischer Objekte berücksichtigen. Zur Objektpermanenz kommt die "Undurchdringlichkeit" und die "Kontinuität der Bewegungsbahn" (Spelke et al., 1992). Simon (1997) sieht darin eine eigenständige Kompetenz, die er "*physical reasoning*" nennt. Es handelt sich um

besondere Formen der Wahrnehmung, die man als Objektkonstanzen bezeichnen könnte. Diese Objektkonstanzen sind eine Voraussetzung für die Diskrimination kleiner Numerositäten, wobei die Objekte primär lokationsbasiert individuiert werden. Simon et al. (1995) führten ein Experiment analog zu demjenigen von Wynn (1992a) durch. In einer zusätzlichen Variation wurden zwei gleichartige Puppen (jeweils Elmo aus der Sesamstraße) nacheinander hinter einen Schirm gestellt. Wurde der Schirm beseitigt, waren zwei unterschiedliche Puppen, (Elmo und Ernie), zu sehen, was aber nicht zu längeren Blicken führte, obwohl sie in einer statischen Bedingung Elmo von Ernie unterscheiden konnten. Säuglinge berücksichtigen die Objekte als abstrakte Einheiten, weswegen die Unterscheidung einer kleinen Numerosität aus solchen Einheiten durch einen gedächtnismäßigen Eins-zu-Eins-Vergleich erklärt werden kann.

Der non-numerische Ansatz vermag jedenfalls die Diskriminationsleistungen von Säuglingen auf der Basis von Gleich-ungleich-Unterscheidungen zu erklären, welche funktional als kardinale Repräsentation kleiner Mengen beschrieben werden können. Auf die Annahme, Säuglinge würden angeborenes numerisches Wissen besitzen, kann verzichtet werden, zumal es keinerlei empirische Hinweise darauf gibt, dass Säuglinge ordinale Relationen zwischen Anzahlen berücksichtigen. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er mit dem Indexing-Modell des Subitizing verknüpft werden kann: die Diskriminationsleistungen der Säuglinge bei kleinen Mengen entsprechen dem pre-counting Subitizing, das es erlaubt, bei kleinen Numerositäten eine Eins-zu-eins-Korrespondenz herzustellen.

5. 3. 2 Aspekte der Zählentwicklung

Da die Diskriminationsleistungen von Säuglingen auch ohne die Annahme numerischer Kompetenzen erklärt werden können, stellt sich die Frage, wie sich die numerische Kompetenz des Zählens entwickelt und welches Verhalten als Indikator dafür angesehen werden kann. In diesem Falle ist die "Rückwärtsstrategie" der Entwicklungspsychologie heuristisch sinnvoll: Ausgehend von der ausgebildeten Zählkompetenz werden Teilkompetenzen bestimmt und untersucht, in welchem Alter welche Teilkompetenzen beobachtbar sind

Studien zur Geschichte des Zählens machen deutlich, dass in unterschiedlichen Zeiten und Kulturen unterschiedliche Weisen des Zählens ausgebildet wurden (Wertheimer, 1912), in einigen Kulturen wurde vermutlich gar keine Zählfertigkeit entwickelt (Damerow, 1994). Die basale Voraussetzung des Zählens, die Bildung von zählbaren Einheiten durch die Wahrnehmungssysteme, ist nicht hinreichend für die Ausbildung eines Zählsystems, ebensowenig wie das Anzahlunterscheiden. Eine wesentliche Voraussetzung ist, dass die zu zählenden Einheiten durch Zählseinheiten eins-zu-eins repräsentiert werden, so dass mit den Zählseinheiten stellvertretend quantifizierende Operationen vollzogen werden können wie Vermehren und Vermindern. Damerow (1994) bezeichnet dies als Repräsentation erster Ordnung. Diese Zählmengen und die damit durchführbaren Operationen wurden wiederum durch Zeichen repräsentiert, mit denen bestimmte abkürzende Operationen wie Multiplikation und Division durchgeführt werden konnten, was Damerow (1994) als Repräsentation zweiter (oder höherer) Ordnung bezeichnet. Vereinfachend gesagt findet sich eine Entwicklung vom konkreten, objektgebundenen Zählen mit Hilfsmengen zum abstrakten, formalen Operieren mit Zahlzeichen, deren Bedeutung ausschließlich syntaktisch festgelegt ist (Krämer, 1988). Festzuhalten ist, dass es sich beim Zählen um eine symbolische und damit semiotische Praxis handelt, die eine begriffliche Unterscheidung zwischen zu zählendem Objekt und Zählzeichen voraussetzt. Zählen ist

eine kulturell-historisch gewordene Fertigkeit, die sozial tradiert, als Kulturfertigkeit geschätzt und als normativer Bildungsinhalt unterrichtet wird.

Im folgenden wird die Annahme diskutiert, dass das Verständnis der Numeralia und deren Verwendung beim Zählen wesentlich sind für die Entwicklung der Zählkompetenz und der Zahlaspekte. Damit wird die Bedeutung der Sprache für die Entwicklung des begrifflichen Verständnisses unterstrichen, was von der Piaget'schen Auffassung der Zahlbegriffsentwicklung abweicht.

5. 3. 2. 1 Die Entwicklung des Zahlbegriffs nach Piaget

Piagets Arbeiten zur Entwicklung des Zahlbegriffs (z.B. Piaget & Szeminska, 1941) vernachlässigen das Verständnis der Zahlwörter genauso wie die auf Numeralia bezogene Zählfertigkeit, was eine wesentliche Lücke in der Theorie Piagets zur Entwicklung des Zahlbegriffs ist (Wartenberg, 1994). Begründet liegt dies vermutlich in seinem Konzept des Zahlbegriffs. Es lässt sich zur These zusammenfassen, dass eine Zahl die Synthese aus Seriation, Anzahlinvarianz und Klasseninklusion ist, welche die Zahlaspekte der Ordinalität und Kardinalität umfasst.

Piaget und seine Schule vertreten die Ansicht, dass sich der Zahlbegriff synchron aus den diesen Aspekten zugrunde liegenden, logischen Operationen entwickelt. Das ausgereifte Zahlkonzept ist demnach das Produkt der kognitiven Systeme der Klassifizierung und Seriation, wobei die Einsicht in den kardinalen Zahlaspekt auf einer Klassenbildung beruht, während sich die ordinale Funktion der Zahl dem Kind auf der Grundlage seiner Fähigkeit zu Seriation bzw. asymmetrischer Reihenbildung erschließt. Das Verständnis des kardinalen Zahlenaspekts beinhaltet also die Erkenntnis logischer Gesetze der Klassifizierung. Unterschiedliche Objekte können anhand eines bestimmten Kriteriums zu einer Klasse zusammengefaßt werden, unabhängig von den sonstigen Merkmalen dieser Objekte. Das Kind muss demnach in der Lage sein, verschiedene Gegenstände zu einer Menge zu gruppieren und von Besonderheiten wie der räumlichen Anordnung der Objekte absehen können. Die Numerosität stellt im Fall der Mengenbildung das relevante klassenbildende Kriterium dar. Um den kardinalen Aspekt der Zahl erfassen zu können, muss das Kind des weiteren die Klassenhierarchie verstehen, damit es Beziehungen zwischen gegebenen Mengen herstellen kann. Das Kind muß erkennen, dass Mengen mit einer kleineren Anzahl von Elementen in die Klasse der Mengen mit jeweils höheren Anzahlen von Elementen eingeschlossen sind.

Das Verständnis des ordinalen Aspekts der Zahl beruht laut Piaget auf der Fähigkeit zur Seriation, die es dem Kind ermöglicht, Elemente nach einer Ordnungsrelation aufzureihen, z. B. nach Größe, Gewicht oder Länge. Durch die geordnete Darstellung asymmetrischer Beziehungen erschließt sich dem Kind ein grundlegendes Verständnis logischer Ordnungsrelationen wie "kleiner als", die es dann auf die Zählreihe übertragen kann. (Ein Erkennen der Ordnungsrelationen zwischen Zahlwörtern ermöglicht dem Kind schließlich den Vergleich zwischen unterschiedlich großen Mengen.)

Damit Fertigkeiten im Umgang mit Zahlen überhaupt möglich werden, muss das Kind ein bestimmtes Denkniveau erreichen, das ihm den Zugang zur operatorischen Bedeutung der Zahlen ermöglicht. Zu dieser Sicht gelangt das Kind nach Piaget erst am Ende des konkret-operatorischen Entwicklungsstadiums im Alter von ca. 7 Jahren.

- Anzahl als Invarianz

Einer der Hauptindikatoren für ein entwickeltes Zahlenverständnis ist nach Piaget die Fähigkeit des Kindes, Anzahlinvarianzaufgaben zu lösen. Diese Fertigkeit wurde von ihm und seiner Forschungsgruppe in zahlreichen Variationen des Invarianzexperimentes bei Kindern getestet.

In einer Versuchsanordnung wurden den Kindern beispielsweise zwei über-einanderliegende, gleich lange Reihen von in der Regel etwa sechs Objekten (wie z. B. Münzen) präsentiert, so dass eine deutlich sichtbare eins-zu-eins Korrespondenz zwischen den Objekten der beiden Anordnungen bestand. Die Frage, ob die beiden Reihen gleich viele Münzen enthielten, konnten die Kinder mehrheitlich ohne weitere Schwierigkeiten bejahen. In einem zweiten Schritt vergrößerte der Versuchsleiter den Abstand zwischen den Münzen der unteren Reihe, ohne jedoch an der Anzahl der Münzen etwas zu verändern; die untere Reihe wurde somit im Vergleich zur oberen Reihe optisch verlängert. Nach dieser Transformation wurden die Kinder erneut befragt, ob die beiden Reihen gleich viele Münzen enthielten. Kinder im voroperatorischen Entwicklungsstadium, d. h. Kinder unter 6 Jahren, gaben nun an, daß die untere Münzreihe mehr Objekte enthalte als die obere.

Piaget bezog dieses Fehlurteil der Kinder auf die für ihre Entwicklungsstufe typische Denkzentrierung auf anschauliche Aspekte, in diesem Kontext auf den Längenunterschied zwischen den Reihen. Kinder im konkret-operatorischen Stadium konnten bei der beschriebenen Invarianzaufgabe die scheinbar widersprüchlichen Aspekte der Situation, Mengenkonzanz trotz Ungleichheit der Reihelängen, miteinander in Einklang bringen. Ihre Fähigkeit zu reversiblen Denken ermöglichte ihnen die Erkenntnis, dass eine Veränderung der Reihelänge durch eine Veränderung in der Reihendichte kompensiert werden kann, und dass der quantitative Aspekt der Anordnung davon unberührt bleibt. Das Konzept der Anzahlkonstanz ist rein logischer Natur und hat mit der Fertigkeit des Zählens nichts zu tun, da die Information, dass kein Element aus den beiden Mengen entfernt oder hinzugefügt worden ist, ausreicht, um auf eine numerische Gleichheit der Mengen zu schließen. Entsprechend hat die Fertigkeit des Abzählens als Strategie des Prüfens der Mengenäquivalenz für Piagets logisch verstandenes Zahlverständnis keine Relevanz.

An der Anzahlkonstanz zeigt sich nach Piaget eine neu gewonnene Flexibilität der kindlichen Denkleistung. Das Kind ist nun in der Lage, sich von einer globalen Wahrnehmungsorientierung zu lösen und sowohl verschiedene Aspekte eines Problems gleichzeitig zu erfassen als auch diese Aspekte in verschiedener Weise miteinander zu verknüpfen. Erst in diesem geistigen Entwicklungsstadium erlangt das Kind nach Piaget ein wirkliches Verständnis des Zahlbegriffs.

Davor befindet es sich in einer *pränumerischen* Phase, in der zahlenbezogene Handlungen noch keinen Begriff von Menge und Anzahl beinhalten. Piaget schloss, dass das Kind im voroperatorischen Stadium noch nicht über ein entwickeltes Zahlkonzept verfügt und seine numerischen Fertigkeiten keine Bedeutung für den Zahlbegriff haben. Die Betonung der logischen Aspekte des Zahlbegriffs ist damit der Grund dafür, dass Piaget die Zählfertigkeit bei der Entwicklung des Zahlbegriffs gar nicht berücksichtigte. Die langwährende Orientierung an der Zahlkonzeption Piagets und entsprechend die Verwendung der Piaget-Aufgaben dürfte wohl auch ein Grund für die paradox anmutende Klage eines Mathematikdidaktikers sein, dass die Psychologie "kaum Interesse für die Entwicklung des Zählens" zeige. "Man schien es als einen rein verbalen Mechanismus zu betrachten, der ohne das geringste Verständnis für die ihm zugrundeliegenden begrifflichen Konzepte abläuft und daher für den Aufbau des Zahlbegriffs bedeutungslos ist" (Maier, 1990; S. 101).

- Kritik

Als besonders problematisch stellte sich die entwicklungspsychologische Hypothese Piagets heraus, dass sich Seriation, Anzahlinvarianz und Klasseninklusion synchron entwickeln. Nach Wartenberg (1994), der eine Metaanalyse von Studien zur Seriation, Zahleninvarianz und Klasseninklusion durchführte, entwickeln sich die Kompetenzen nicht synchron, sondern in der Abfolge: Seriation (6 Jahre), Anzahlinvarianz (6; 7), Klasseninklusion (8 Jahre). Laux' (1969) Befunde sprechen ebenfalls gegen eine Synchronizität. Aber auch Untersuchungen zu den einzelnen Aufgabentypen zeigten, dass kindgerechtere Instruktionen dazu führen, dass sich beispielsweise schon bei 3jährigen Mengeninvarianzleistungen feststellen lassen (McEvoy & O'Moore, 1991). Mehler & Bever (1967) zeigten, dass 2jährige Kinder bei essbaren Mengenelementen häufig die kürzere Reihe wählten, in der aber mehr Bonbons platziert waren als in der längeren Bonbon-Reihe, was aber die 3- bis 4jährigen nicht taten. Die Autoren vermuten, dass die älteren Kinder die Intentionen der Versuchsleiter und damit die Aufgabe anders interpretierten. Dies konnten McGarrigle & Donaldson (1974) bestätigen: 3- bis 4jährige Kinder, die mit der Piaget-Aufgabe zur Anzahlinvarianz untersucht werden, verstehen häufig die Instruktion anders als die Versuchsleiter meinen. Insofern sind Zweifel an der Zahlkonzeption Piagets berechtigt, die das Zahlverständnis primär durch bestimmte logische Relationen bestimmt. Auch Kinder, die deutlich jünger als 6 Jahre alt sind, besitzen einige Zählfertigkeiten, noch bevor sie logische Relationen verstehen, die auch durch Zahlen symbolisiert werden können (Voigt, 1983; Briars & Siegler, 1984; Fuson, 1988b). Es ist vielmehr im Sinn der principles after - Position anzunehmen, dass die Zählfertigkeit, die in der erlernten Verwendung von Zahlennamen beim Abzählen besteht, die Entwicklung des Zahlverständnisses und der Semantik des Zahlensystems begünstigt. Voigt (1983) hat im Rahmen einer Längs-schnittstudie mit 4 bis 6jährigen Vorschulkindern einen engen Zusammenhang zwischen der Fertigkeit, mit der Zählreihe umzugehen, und dem Zahlbegriff festgestellt. Voigt zufolge bilden Strategien, die das Kind beispielsweise bei der Ausführung von Mengenvergleichen auf konkret-anschaulichem Niveau erworben hat, notwendige Entwicklungsvorläufer des abstrakten Zahlinvarianzverständnisses, das nach Piaget wiederum ein wichtiger Indikator des Zahlbegriffs ist. Vor diesem Hintergrund, so Voigt, ist es schwer nachzuvollziehen, weshalb Piaget in seiner Theorie der Zahlbegriffsentwicklung den Zählfertigkeiten der Vorschulkinder einen so geringen Stellenwert einräumt.

5. 3. 2. 2 Numerischer Mengenvergleich: Das Erkennen von Äquivalenzrelationen

- Anzahl als Klassifikationskriterium

Ein wesentlicher Ausgangspunkt für die Entwicklung numerischer Kompetenzen ist sicherlich die von Piaget hervorgehobene Invarianzleistung der Anzahlkonstanz. Untersuchungen basieren auf dem Vergleich zweier Mengen, die unterschiedlich viele Elemente und/oder unterschiedliche Anordnungen der Elemente aufweisen : Es wird die Frage gestellt, ob diese Mengen gleich viele Elemente haben oder nicht. Das Kriterium für den Vergleich ist die Anzahl, die in diesem Falle eine klassenbildende Funktion hat: zwei oder mehrere Mengen, die gleich viele Elemente haben, bilden eine Klasse, ihr Name ist das Zahlwort für deren Anzahl. Nach Russel (1924) bezeichnet eine Zahl die Klasse aller zueinander äquivalenten Mächtigkeiten. Um zu erkennen, dass zwei Mengen gleichmächtig sind, muss das Kind die Anzahl als klassenbildendes Kriterium verstehen. Folglich lässt sich der Mengenvergleich

als Beispiel der allgemeinen, domänenübergreifenden Fähigkeit konzeptualisieren, die dem Klassifizieren und Kategorisieren zugrunde liegt. Mix (1996, 1999a, 1999b) untersuchte, ob die Fähigkeit von Kindern im Vorschulalter, Mengen entsprechend der Anzahl ihrer Elemente zu klassifizieren, eine domänenspezifische, zahlenbezogene Fähigkeit ist oder eine allgemeine Klassifikationsleistung. Beim non-numerischen Klassifizieren wurde gefunden, dass neben der perceptiven Ähnlichkeit auch die sprachlichen Bezeichnungen der zu klassifizierenden Objekte eine bedeutsame Rolle spielen: Wenn kleine Kinder die sprachlichen Bezeichnungen der Kategorien kennen, dann verbessern sich ihre Leistungen bei Vergleichsaufgaben erheblich (Gelman & Markman, 1987; Gentner, Ratterman, Markman & Kotovsky, 1995; Sandhofer & Smith, 1999; Waxman & Markow, 1995). Sandhofer & Smith (1999) beispielsweise fanden, dass einige 2-jährige Kinder erst dann Objekte anhand ihrer Farbe und ihrer Größe ordnen konnten, nachdem sie die Bezeichnungen für diese Merkmale erworben hatten. Meist dominiert jedoch die perceptive Ähnlichkeit der Objekte: Schon sehr kleine Kinder können einzelne rote Bälle zu der Kategorie "rot" zusammenfassen, aber nicht unterschiedlich aussehende rote Gegenstände, wie z.B. einen roten Stift, ein rotes Auto und einen roten Ball. Die Kenntnis der Farbwörter und deren Bedeutung als Klassifikationskriterium erleichtern die Klassenbildung erheblich.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die Domäne des numerischen Klassifizierens eine Ausnahme bildet. Berücksichtigt man das von Gelman & Gallistel (1978) postulierte Abstraktionsprinzip, so könnten Mengen hinsichtlich ihrer Mächtigkeit verglichen werden, auch wenn die enthaltenen Objekte unterschiedlich aussehen. Die Befunde zur numerischen Abstraktionsfähigkeit von Säuglingen scheinen auf eine besondere, domänenspezifische Entwicklung dieser Fähigkeit des Klassifizierens nach dem Kriterium der Anzahlgleichheit hinzudeuten. Allerdings scheint auch die alternative Erklärung sinnvoll, die als Indexing-Hypothese im Zusammenhang mit Segmentations- und Bindungsproblemen erörtert wurde. In der Säuglingsforschung fanden außerdem überwiegend kleine Numerositäten Verwendung und schließlich kann im Habituationparadigma kein expliziter numerischer Vergleich einer Numerosität mit einer anderen durchgeführt werden. Numerische Äquivalenzurteile sehr kleiner Kinder lassen sich am besten mit den Befunden zur Blickdauerpräferenz von Starkey et al. (1990) vergleichen. Allerdings konnte nicht repliziert werden, dass Säuglinge diejenige Numerosität länger anschauen, welche in der Numerosität mit den zuvor gehörten Tönen übereinstimmt (Mix, Levine, & Huttenlocher, 1997; Moore, Benenson, Reznick, Peterson, & Kagan, 1987). Vielmehr wurde festgestellt, dass die angebliche numerische Abstraktionsfähigkeit von Säuglingen bei Vorschulkindern sehr selten zu finden ist: Die numerischen Fertigkeiten von Vorschulkindern scheinen in hohem Maße kontextgebunden zu sein (Gast, 1957; Schaeffer et al., 1974; Shipley & Shepperson, 1990; Siegel, 1973; Wynn, 1990, 1992b; Mix, Huttenlocher und Levine, 1996; Mack & Meyer, in Vorb.; Mack & Emrich, in Vorb.).

Mix et al. (1996) beispielsweise untersuchten die numerischen Leistungen 3- und 4-jähriger mit einem non-verbalen Triaden-Vergleich kleiner Objekt- und Ereignismengen. In einem Experiment bekamen die Kinder eine Zielmenge auditiv präsentiert, indem eine bestimmte Anzahl durch Klatschen der Hände dargeboten wurde. Anschließend wurden vor dem Kind zwei Karten umgedreht, auf denen schwarze, linear angeordnete Punkte zu sehen waren, auf je einer die gleiche Anzahl des Händeklatschens. Der Abstand der Punkte wurde variiert. Die Kinder wurden instruiert, die zur Zielmenge passende Karte durch Zeigen auszuwählen. Mix et al. (1996) stellten einen Alterseffekt fest: 3-jährige Kinder schnitten bedeutsam schlechter ab als 4-jährige. Allerdings waren die Leistungen beider Altersgruppen deutlich besser, wenn die Zielmenge nicht akustisch, sondern visuell-simultan in

gleicher Weise wie die Auswahlmengen auf einer Karte dargeboten wurde, wobei die Zielmenge und die Auswahlmengen separat nacheinander präsentiert wurden. Mix et al. (1996) interpretierten dies als Effekt der Modalität und nimmt einen modalitätsspezifischen Mengenerfassungsmechanismus an. Mack & Meyer (i. Vorb.) konnten zeigen, dass es sich nicht um einen Effekt der Modalität, sondern der sequentiellen Komplexität handelt: Da das Enumerieren auditiver Ereignisse sequentiell erfolgt, wurde auch in der visuellen Modalität die Numerosität nacheinander präsentiert, indem die entsprechende Anzahl von Karten mit je einem Punkt gezeigt wurde. Zwischen den sequentiellen Bedingungen in beiden Modalitäten fand sich kein bedeutsamer Unterschied; beide Bedingungen unterschieden sich bedeutsam von der visuell-simultanen Präsentationsbedingung. Bemerkenswert ist auch der Numerositätseffekt: Die non-verbale Erfassung von vier Elementen war in allen Bedingungen bedeutsam schlechter als die Erfassung von drei Elementen, die sich nicht bedeutsam von der zweier Elemente unterschied. Dies belegt wiederum, dass die exakte Wahrnehmung von Numerositäten auf kleine Mengen beschränkt ist, was durch das altersinvariante Subitizing erklärt werden kann.

Neben der sequentiellen oder simultanen Darbietung spielt auch die Homogenität der Elemente eine große Rolle für die Anzahlerfassung. Gast (1957) konnte in einer Reihe von Experimenten zeigen, dass Kinder zwischen 3 und 4 Jahren die Numerosität einer kleinen Menge dann richtig benennen können, wenn die Elemente gleich aussehen. Wurden Merkmale der Elemente wie Größe, Form oder Farbe variiert, fiel die Enumerationsleistung bedeutsam ab. Gast kannte die Arbeiten Piagets nicht, kommt aber ähnlich wie Piaget zu dem Schluss, dass die numerische Kompetenz, nach Gast das "Zahlendenken", vor dem 5. Lebensjahr wahrnehmungsgebunden ist. Auch Siegel (1973) berichtet einen Heterogenitäts-effekt bei Kindern zwischen 3 und 7 Jahren. Er gab Mengen mit ein bis neun Elementen vor, und die Kinder sollten aus vier Alternativen eine gleich große Menge auswählen. Ein Teil der Kinder bekam gleichartig aussehende Kleckse (homogene Bedingung), ein anderer Teil Kleckse, die in Form und Farbe variierten. Die Leistungen der 4 und 5jährigen Kinder bei der Mengenzuordnung fielen in der Heterogenitätsbedingung schlechter aus, bei jüngeren Kindern nochmals deutlich schlechter. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Mix (1999b), die 3- und 4 jährige Kinder in drei experimentellen Bedingungen untersuchte: In der "Übereinstimmungsbedingung" wurden für Ziel- und alternative Auswahlmengen identisch aussehende Elemente (kreisrunde, knopfartige schwarze Holzteilchen) verwendet. In der zweiten Bedingung wich das Aussehen der Elemente der Zielmenge deutlich von demjenigen der Auswahlmengen ab: es wurden rote, muschelförmige Nudeln benutzt. In der dritten Bedingung wurden verschiedene Objekte aus dem Haushalt als Elemente der Zielmenge verwendet (z.B. eine rote Feder, eine kleine Batterie, ein Flaschenverschluss usw.), die den Elementen der Auswahlmenge hinsichtlich Form, Größe, Farbe usw. überhaupt nicht ähnlich waren. Die erste Bedingung bewältigten bereits die 3jährigen, die zweite Bedingung nur noch die 3;5jährigen und die dritte erst die Kinder ab 4;5 Jahren.

Zusammenfassend belegen diese Studien, dass der non-verbale, perzeptive Vergleich kleiner Mengen bezüglich ihrer numerischen Äquivalenz von dem Aussehen der Vergleichsobjekte beeinflusst wird. Vor allem jüngere Vorschulkinder orientieren sich stärker am Aussehen der Elemente; ihnen gelingt es kaum, vom unterschiedlichen Aussehen der Elemente abzusehen und die Menge als Vergleichsganzheit zu behandeln. Die sich so manifestierende Wahrnehmungsgebundenheit beim Mengenvergleich kann erst mit ca. viereinhalb Jahren überwunden werden. Im Gegensatz zum von Gelman & Gallistel (1978) postulierten Abstraktionsprinzip können die jüngeren Kinder bei der Ausführung zahlenbezogener Aufgaben nicht auf den Aspekt der Numerosität fokussieren und numerisch irrelevante Merkmale ausblenden.

- Verbale Zählfertigkeit

Wie die Befunde aus der Säuglings- und Tierpsychologie zeigen, können unterschiedliche Numerositäten diskriminiert werden. Bei sehr kleinen Numerositäten kann das mit perzeptiven Mechanismen der Objekt- und Ereignisindividuation, bei großen Numerositäten mit Diskriminationsmechanismen, die nach dem Weber-Fechner Gesetz beschreibbar sind, erklärt werden. Diese non-verbale Kompetenz der Mengenerfassung erklärten Gelman & Gallistel (1978) mit Numerons als non-verbale Analoga zu den Numeralwörtern. Gegen dieses Modell können jedoch theoretische und empirische Argumente angeführt werden. Die Numerons erfüllen nur die Funktion von Marken, die außer der Eins-zu-Eins-Korrespondenz keine weiteren Zahlaspekte repräsentieren. Würden weitere Zahlaspekte repräsentiert, würden nicht nur sehr kleine Numerositäten exakt repräsentiert werden. Hinzu kommt, dass das Diskriminieren von Numerositäten nicht mit Abzählen gleichgesetzt werden kann. Das Abzählen impliziert nicht nur das Verständnis mehrerer logischer Relationen zwischen Mengen, z.B. die Transitivitätsrelation, sondern setzt den Zahlbegriff voraus. Die Entwicklung des Anzahlbegriffes wird über das Kardinalitätsverständnis kleiner Kinder untersucht und ihnen zugesprochen, wenn sie auf die Frage, "Wieviele...?", nach mindestens einem der folgenden vier Kriterien abzählen (vgl. Gelman & Gallistel (1978)):

- (1) Betonung des letzten verwendeten Zählwortes
- (2) Wiederholung dieses Zählwortes
- (3) Angabe der richtigen Numerosität einer Menge ohne nochmaliges Zählen
- (4) oder Angabe der korrekten Kardinalzahl ohne die Menge äußerlich feststellbar abzuzählen

Diese Kriterien wurden jedoch als nicht ausreichend erachtet, um auf das Vorliegen des Kardinalitätsverständnisses schließen zu können. Wynn (1990) hebt hervor, dass die Betonung oder Wiederholung des letztverwendeten Zählwortes, durch Imitation von Erwachsenen in typischen Abzählsituationen erlernt worden sein könnte. Zusätzlich besitzen kleine Kinder die Antworttendenz, bei der Vorgabe von Wahlalternativen die zuletzt aufgeführte zu wählen (Siegel & Goldstein, 1969; Fuson, 1988b). Da häufig kleine Numerositäten verwendet werden, ist die Wahrscheinlichkeit zufällig richtiger Antworten hoch, zumal Kinder die Verbindung zwischen der Frage nach der Numerosität einer Menge und dem Nennen eines Zahlwortes schon früh lernen, wobei die Zahlwörter für kleine Numerositäten den Kindern geläufiger sind als diejenigen für große Numerositäten (Wynn, 1990; Fuson, 1988b). In einer Reihe von Untersuchungen ist es nicht gelungen, eine spezifische Disposition für das Kardinalitätsverständnis bei kleinen Kindern nachzuweisen (Schaeffer et al., 1974; Fuson, 1988b; Wynn, 1990, 1992b). Typischerweise reagieren Kinder mit einem mittleren Alter von 3;5 Jahren auf die wiederholte Frage nach der Anzahl der gezählten Objekte mit erneutem Abzählen der Menge. Fuson (1988b) führt noch eine weitere typische Verhaltensweise 2 bis 3jähriger auf, die gegen die Validität der Kardinalitätsindikatoren von Gelman & Gallistel (1978) sprechen: Kinder, die auf die Frage nach der Anzahl einer abgezählten Menge mit dem zuletzt genannten Zahlwort antworten, erkennen oft nicht, dass das letzte Wort in der von ihnen genannten Zählsequenz die Mächtigkeit der abgezählten Menge angibt. Wird dann nachgefragt, worauf sich das zuletzt genannte Zahlwort bezieht, dann zeigen sie häufig auf das zuletzt gezählte Objekt der Menge.

Ein Problem dieser Studien ist, dass sie numerische Fertigkeiten primär verbal untersuchen und damit non-verbale Aspekte numerischer Fertigkeiten unterschätzen. Gelman & Gallistel (1978)

schlugen ihr Numeron-Modell vor, um hervorzuheben, dass die kulturspezifischen Numeralia nicht konstitutiv für die Zählprinzipien sind. Dies ist plausibel, da die jeweiligen sprachspezifischen Varianten der Numeralia für das korrekte Zählen nicht relevant sind. Die Numerons sind jedoch durchaus als eine Art Zeichensystem des Zählens konzipiert, dessen Zusammenhang mit der Sprache vernachlässigt wird. Gelman & Gallistel (1978) betonen, dass die Fehler, die Kinder in verbalen Zählaufgaben machen, als mangelnde Zählkompetenz interpretiert werden. Zählfehler können auch dadurch zustande kommen, dass das Kind die konventionelle Zählreihe nicht beherrscht und stattdessen eine idiosynkratische verwendet.

Es ist daher geboten, verbale und non-verbale numerische Kompetenzen zusammen zu untersuchen. Diesen Weg beschritten beispielsweise Mix (1996, 1999a, 1999b) sowie Mack & Meyer (i. Vorb.). In den Untersuchungen wird zunächst mit einem non-verbalen Verfahren die numerische Kompetenz von Vorschulkindern geprüft, z.B. mit der o.g. Triaden-Aufgabe. In der zweiten Phase der Untersuchung wird die verbale Zählfähigkeit der Kinder mit zwei Aufgaben getestet, die als Indikatoren des Kardinalitätsverständnisses dienen (Wynn, 1990, 1992b). Die "Wieviele..?" -Aufgabe besteht darin, dass die Kinder eine lineare Anordnung schwarzer Klötzchen laut abzählen sollen. Anschließend werden sie gefragt, wieviele Klötzchen das nun sind. Die "Leg mir eine Menge -X"-Aufgabe besteht darin, dass die Kinder aus einem Häufchen von 15 gleichartigen Klötzchen jeweils 1 bis 6 h daneben legen sollen. Durch die Verwendung dieser Zählaufgaben kann untersucht werden, ob die non-verbale Zählkompetenzen unabhängig von den verbalen vorhanden sind. In allen erwähnten Studien fanden sich bedeutsame positive Korrelationen zwischen der verbalen Zählfertigkeit und den non-verbalen Mengenäquivalenzwahlaufgaben. Dieser Zusammenhang blieb auch nach Auspartialisieren des Alterseinflusses erhalten. Vermutet werden kann daher, dass der Erwerb der konventionellen verbalen Zählroutine nicht nur den Mengenvergleich fördert, sondern möglicherweise sogar eine Voraussetzung für das Erkennen der Gleichmächtigkeit von Mengen ist. Diese Vermutung wird von Studien gestützt, in denen das Aussehen der einzelnen Mengenelemente variiert wurde (Mix, 1999b; Mack & Emrich, i. Vorb.). In diesen Studien waren ausschließlich diejenigen Kinder, die verbal sehr gut zählen konnten, auch gut bei non-verbalen Zuordnungsaufgaben. Mit 4;6 bis 5;0 Jahren verstehen Kinder vermittelt Abzählen die Anzahl als klassenbildendes Kriterium. Ähnlich wie in anderen Domänen lässt sich beim Zählen eine graduelle Dekontextualisierung des Klassenbildens feststellen (DeLoache, 1989; Gentner, 1988; Gentner & Rattermann, 1991; Kotovsky & Gentner, 1996). Erstens beeinflusst die wahrgenommene Ähnlichkeit das Mengenzuordnen der Kinder: Kleinere Kinder können einander äquivalente Mengen nur dann gut erkennen, wenn deren Elemente ähnlich aussehen. Ältere Kinder können von Unterschiedlichkeiten des Aussehens absehen und unabhängig davon Mengen als einander numerisch äquivalent erkennen. Zweitens wird die Klassifikation durch Benennen der Klassen gefördert ("labeling"-Effekt). Kinder, die nicht mit den Zahlwörtern umgehen können, sind stärker von der Wahrnehmung abhängig, da sie nur Mengen mit sehr ähnlich aussehenden Elementen hinsichtlich der Numerosität einander zuordnen können.

Entwicklungspsychologisch ist bedeutsam, dass die Zählfertigkeit erworbenen Zahlkategorien entspricht und durch domänenübergreifende Fähigkeiten unterstützt wird. Die Fähigkeit des Quantifizierens ist zunächst eine Wahrnehmungsleistung: Können die quantitativen Beziehungen zwischen den Elementen zweier Mengen unmittelbar wahrgenommen werden, so können schon 3jährige die Mengenäquivalenz korrekt beurteilen. Sophian (1987) zeigte dies besonders deutlich beim elementweisen Vergleich zweier Mengen. Sie präsentierte 3jährigen zwei Mengen, vier Clowns und

drei Ballons. In einer Bedingung wurden Clowns und Ballons eins-zu-eins einander zugeordnet, in einer zweiten Bedingung waren beide Mengen getrennt von einander. In beiden Bedingungen wurden die Kinder gefragt, ob genug Ballons für alle Clowns vorhanden wären, was die Kinder der ersten Bedingung häufiger richtig beantworteten.

Der Numerositätseffekt belegt den Bezug des Quantifizierens zur Wahrnehmung: Bei Mengen mit Numerosität 3 werden weniger Fehler gemacht als bei Mengen mit Numerosität 4 und bei diesen weniger als bei Mengen mit Numerosität 5, wobei Fehler mit zunehmenden Alter weniger werden. Subitizing scheint folglich für den Erwerb der Zählfertigkeit von Nutzen zu sein. Die Erkenntnis, dass kleine Mengen einander numerisch äquivalent sind, erleichtert die Zuordnung eines (gemeinsamen) Zahlennamens und das Verständnis der Zählreihe. Diese Äquivalenzerkenntnis durch Subitizing erklärt auch die Wahrnehmung der Anzahlkonstanz bei räumlich unterschiedlich ausgedehnten (kleinen) Mengen (z.B. Siegler, 1981). Piagets Erklärung der Anzahlkonstanz durch das Anwenden eines logischen Schlusses, da nichts weggenommen oder hinzugefügt worden ist, scheint nicht zuzutreffen.

Bei größeren Mengen gelingt der Abgleich älteren Vorschulkindern durch Abzählen, was daran festzustellen ist, dass die Fehlerdifferenz zwischen kleineren und größeren Numerositäten mit dem Alter abnimmt. Somit haben sie zunächst verstanden, dass Zahlennamen zur Klassifizierung gleichmächtiger Mengen dienen, was die Vertiefung des Kardinalitätsverständnisses fördert. Erst ältere Kinder stellen Anzahlkonstanz auch logisch fest, wenn sie auf die Transformation einer Menge achten, was sich bei typischen Mengen-Paar-Vergleichsaufgaben zur Anzahlkonstanz zeigt: Die Reaktionszeiten jüngerer Kinder bei kleinen Mengen zur Anzahlkonservierung sind länger als diejenigen älterer Kinder bei größeren Mengen (Gold, 1987).

- Entwicklung numerischer Kompetenzen

Die Befunde zu den numerischen Kompetenzen von Vorschulkindern lassen ebenfalls die Annahme, Säuglinge verfügten über angeborene numerische Kompetenzen wie die numerische Abstraktion fragwürdig erscheinen. Wäre dem so, dann müsste sich im Entwicklungsverlauf das Erkennen numerischer Äquivalenzklassen deutlich von demjenigen non-numerischer Äquivalenzklassen unterscheiden. Mengen müssten nach ihrer Numerosität besser klassifiziert werden als beispielsweise unterschiedliche rote Objekte, was aber nicht der Fall zu sein scheint. Die scheinbare Diskontinuität zwischen der Fähigkeit von Säuglingen, unterschiedlich aussehende kleine Mengen nach der Numerosität zu diskriminieren und den Schwierigkeiten 3-jähriger Vorschulkindern, unterschiedlich aussehende gleichmächtige Mengen einander zuzuordnen, ist damit zu erklären, dass die Numerositätsdiskriminationsleistungen der Säuglinge nicht Ausdruck numerischer Kompetenzen sind. Sie sind Resultate der quantitativen Strukturiertheit der Welt, die Wahrnehmungssysteme nutzen müssen durch die Bildung adäquater Einheiten in Raum und Zeit. Damit wird die auf kleine Numerositäten beschränkte Fähigkeit der Säuglinge, numerische Äquivalenzklassen zu bilden als eine Kernkompetenz betrachtet. Diese Kernkompetenz sollte nicht als numerische interpretiert werden mit dem Hinweis, es sei lediglich die Performanz eingeschränkt und somit würde sich nicht die Kompetenz entwickeln, sondern die Performanz. Eine solche Kompetenztheorie ist tautologisch, da sie über die Berufung auf Performanzrestriktionen unwiderlegbar wird. Die Stärke einer Kompetenztheorie besteht darin, nicht jede Fehlleistung als Indikator für fehlende Kompetenz zu interpretieren; andererseits ist sie wertlos, wird nicht angegeben, wie und bei welcher Anforderung sich die Kompetenz zeigen soll. Für die entwicklungspsychologische Theoriebildung ist es daher wichtig, von der Einheit aus

Kompetenz und Performanz auszugehen. Wenn unter bestimmten Performanzanforderungen es den Anschein hat, dass die Kompetenz nicht vorliegt, dann ist es angemessen davon auszugehen, dass die Kompetenz nicht vollständig ist. Ist man nicht bereit, nur die Kompetenz zuzuschreiben, die sich auch in der Performanz zeigt, dann kann man beliebige Kompetenzen annehmen mit dem Hinweis, dass eben die Realisationsbedingungen nicht gegeben sind. Eine nativistische Auffassung, die sich auf eine solche Kompetenztheorie beruft wäre ebenfalls tautologisch.

Vergleicht man die beiden Arten von Abstraktion bei Säuglingen und Vorschulkindern, dann wird deutlich, dass es sich um zwei qualitativ völlig unterschiedliche psychische Prozesse handelt. Angelehnt an Karmiloff-Smith's (1992) "representational redescription"-Modell (RR-Modell) kann man im ersten Falle von unbewussten, impliziten kognitiven Prozessen sprechen, die auf der basalen Ebene der perzeptiven Analyse und Synthese ablaufen. Sie ermöglichen Objektkonstanz, wobei die numerische Identität eines Objekts bereits ein Fall der Anzahlkonstanz ist. Die Individuation einer kleinen Objekt- und Ereignismenge ist wiederum die Voraussetzung für die Diskriminierbarkeit von Objekten und Ereignissen. Im zweiten Falle ist die Abstraktion des unterschiedlichen Aussehens und der Modalität der Objekte beim Mengenvergleich der Vorschulkinder nicht mehr ausschließlich auf implizitem Wissen basiert. Die Kinder verstehen, dass sie Kollektionen von Objekten daraufhin vergleichen sollen, ob sie anzahlmäßig gleich oder verschieden sind. Sie sollen eine Wahl durch Zeigen treffen und sie kennen die Zahlworte für kleinere Numerositäten. Dabei sind bewusste Überlegungen enthalten. Die beiden unterschiedlichen Abstraktionsleistungen lassen sich als implizite bzw. explizite Abstraktion kennzeichnen, wenn man sich die unterschiedlichen Anforderungen beider Aufgaben vor Augen führt: Die Säuglinge erfassen jede unterschiedliche Numerosität separat und generalisieren ihr Blickverhalten, wohingegen die Vorschulkinder einen direkten Vergleich zwischen Mengen durchführen. Mix (1999b) spricht in diesem Zusammenhang angelehnt an Smith (1993) von "implicit similarity" als einer Art der Reaktionsgeneralisierung, da nur auf ein Merkmal wie "rot" bei ansonsten unterschiedlichen Merkmalen reagiert wird. Im Gegensatz dazu beansprucht der direkte paarweise Vergleich von Objekten "explicit similarity", da nun das Merkmal als klassenbildendes Kriterium verwendet wird. Sandhofer & Smith (1999) fanden bei Vorschulkindern Hinweise auf die Gültigkeit dieses Unterschieds: Sie konnten zwar Objekte mit dem richtigen Farbenwort benennen, aber nicht die Objekte gleicher Farbe gruppieren.

5. 4. Die Entwicklung des Zählens im Rahmen des Repräsentationalen Redeskription-Modells (RR-Modell) von Karmiloff-Smith.

Das RR-Modell von Karmiloff-Smith (1992) erscheint gut geeignet, die Entwicklung von der impliziten Abstraktion und Erfassung kleiner Anzahlen hin zur expliziten Abstraktion der Mengenäquivalenz durch das zählende Bestimmen der Kardinalität zu erklären. Es versucht, die konstruktivistische Auffassung der Entwicklung, die vor allem Piaget vertreten hat, mit nativistischen Positionen zu harmonisieren. Die Schlussfolgerung, die sich aus der Anwendung des RR-Modells auf die Zahlentwicklung ziehen lässt, stimmt mit derjenigen Piagets überein, dass die Zahl das Resultat einer begrifflichen Konstruktion ist. Allerdings wird die einseitige Betonung des logisch-algebraischen Zahlaspekts vermieden. Auch die Annahme, dass zwei grundlegende Wissensarten bei der Entwicklung des Zahlbegriffs eine Rolle spielen, haben das RR-Modell und die Konzeption Piagets gemeinsam.

Nach Piaget ist die Zahl das Resultat einer doppelten Abstraktion: der einfachen oder empirischen und der reflektierenden Abstraktion (v. Glasersfeld & Richards, 1983). Die einfache Abstraktion umfasst diejenigen Prozesse, die zur Bildung von sensu-motorischen Einheiten führen, die wiederum Voraussetzung der Zählbarkeit sind. Die reflektierende Abstraktion umfasst diejenigen Prozesse, die die sensu-motorischen Einheiten als Material umfassenderer Einheiten verwenden⁵.

Das RR-Modell

Das RR-Modell nimmt ebenso wie Piaget oder Damerow zwei grundlegend verschiedene Repräsentationsebenen an, wobei die höhere Ebene weiter differenziert wird. Das Modell will darstellen, wie sich die Repräsentationen im Laufe der Entwicklung in "höhere Formate" ("representational redescription") verändern. Dadurch soll die Zunahme der verhaltensmäßigen und kognitiven Flexibilität sowie die Entwicklung des bewussten Zugangs zu Wissen und Fertigkeiten erklärt werden. Wie Fodor (1983) geht Karmiloff-Smith davon aus, dass das kognitive System spezialisierte, automatisch funktionierende Teilsysteme enthält, die Fodor Module nannte. Im Gegensatz zu Fodor sind diese jedoch nicht völlig gegenüber den kognitiven Prozessen anderer Teilsysteme abgeschottet, sondern darin enthaltene implizite Information kann durch repräsentationale Redeskription in das explizite Wissen überführt werden. Das kann domänenspezifisch, aber auch über verschiedene Domänen hinweg ablaufen. Das Anstoßen und Aufrechterhalten der Prozesse der repräsentationalen Redeskription wird von Karmiloff-Smith nur sehr allgemein dargestellt. Sie spricht von einem spontan auftretenden inneren Antrieb, Verknüpfungen innerhalb und zwischen Domänen aufzubauen; dieser endogene Prozess kann auch von äußeren Einflüssen getriggert werden. Sie hebt hervor, dass der RR-Prozess domänenunspezifisch ist und dass es sich beim RR-Modell um ein Phasen-, nicht ein Stufen-Modell im Sinne Piagets handelt. Entscheidend ist, dass sich das Stufen-Modell auf die entwicklungsmäßige Veränderung des kognitiven Systems insgesamt bezieht, das Phasen-Modell hingegen nur auf einzelne Domänen oder gar Mikrodomänen.

Karmiloff-Smith unterscheidet 3 Phasen, die sich in allen Entwicklungsprozessen unterschiedlichster Wissens- und Fertigkeitsdomänen finden lassen: Phase 1 ist eine datengetriebene Lernphase, die völlig von der externen Stimulation abhängt. Aus diesen Daten werden einfache additive, repräsentationale Verknüpfungen erstellt, die nicht mit anderen Domänen verbunden sind. Diese Phase endet mit einer bestimmten Fertigkeit, die Karmiloff-Smith "behavioral mastery" nennt. Sie unterscheidet dabei zwischen verhaltensbezogener und repräsentationaler Veränderung. Diese Unterscheidung kann die häufig zu findenden U-förmigen Entwicklungsverläufe von kindlichen Verhaltensweisen erklären. Ein bestimmtes Verhalten, z.B. das Ausbalancieren von Gewichten auf einem Drehhebel gelingt zunächst, wird dann schlechter und erreicht später wieder das

⁵Piaget definiert reflektierende Abstraktion "als jenen Modus von Abstraktion (...), der nicht, wie die einfache Abstraktion, von Objekten ausgeht, sondern von den Aktionen und Operationen des Subjekts: diese Abstraktion 'reflektiert' daher im doppelten Sinne des Wortes, in einem quasi physikalischen Sinne, in dem sie (wie ein Strahl) das, was sie auf einer niederen Ebene erfaßt, auf eine höhere Ebene reflektiert, sowie im kognitiven Sinne der geistigen Reflexion. So definiert ist die reflektierende Abstraktion notwendigerweise konstruktiv und erweitert und bereichert die Ausgangsstrukturen, indem sie sie in der Arbeit der Reflexion rekonstruiert, eine Arbeit, die neue Strukturen entwickelt, die wiederum operativ sind und sich nicht mehr nur der einfachen Reflexion bedienen, der sie ihre Entstehung verdanken" (1985, S. 273).

Ausgangsniveau. Die beiden erfolgreichen Verhaltensweisen basieren auf unterschiedlichen Repräsentationen. Mit dieser Konzeption wird die Grundidee Piagets von der qualitativen kognitiven Veränderung in der Entwicklung beibehalten, aber auf der Ebene der Repräsentationen interpretiert und auf kognitive Teilsysteme beschränkt. Phase 2 ist intern gesteuert, und die system-interne Dynamik dominiert die von außen kommende Information. Zahlreiche Informationen aus der Umgebung werden nicht beachtet oder inadäquate Informationen, was zu vermehrten Fehlern führen kann. Die Repräsentationen koppeln sich teilweise von äußeren Informationen ab. Erst in der Phase 3 werden interne Repräsentationen und externe Daten ausbalanciert und harmonisiert.

Unschwer lässt sich die Verwandtschaft dieses 3-Phasen-Modells mit dem Piaget'schen Dreischritt aus Assimilation, Akkommodation und Äquilibration erkennen. Karmiloff-Smith beschreibt Annahmen über die Veränderung der Repräsentationsformate in den iterierenden drei Phasen. Sie postuliert 4 Ebenen, auf denen Wissen repräsentiert und re-repräsentiert wird: implizit (I), explizit-1 (E1), explizit-2 (E2) und explizit-3 (E3). Diese Repräsentationsebenen entsprechen nicht altersbezogenen Stufen, sondern es handelt sich um eine Lernsequenz des Wissenserwerbs, die in jedem Alter in unterschiedlichen Domänen auftreten kann. Auf der Ebene (I) haben die Repräsentationen das Format von Prozeduren, d.h. die Informationen werden prozedural enkodiert, sequentiell spezifiziert und unabhängig voneinander abgespeichert. Sie sind abgeschlossen ("eingeklammert"), daher gibt es keine repräsentationalen Verbindungen zwischen den Prozeduren innerhalb und außerhalb der Domäne. Die Prozedur ist nur als ganze verfügbar. Erst auf der Ebene (E1) können Teile der Prozedur separat verwendet sowie erste Verbindungen zu anderen Prozeduren hergestellt werden. Die zunehmend mehr Transfer ermöglichenden Verknüpfungen zwischen Prozeduren nehmen auf den Ebenen (E2) und (E3) weiter zu. Auf der Ebene (E1) findet damit eine Bündelung der zunächst unverbundenen Prozeduren von (I) statt, die nicht mehr voneinander isoliert sind, sondern zahlreiche Verknüpfungsmöglichkeiten aufweisen. Zahlreiche Details aus der Erwerbssituation gehen verloren, die Repräsentationen sind vereinfacht und weniger spezialisiert, was z.B. die Bildung von Analogien oder neuen Wortkomposita erlaubt. Diese Redeskription kann auch unabhängig von dazu passenden Input-Output-Relationen aufgrund interner Dynamik stattfinden. Repräsentationen der Ebene (I) gehen nicht verloren, sondern können bei speziellen Anforderungen wieder verwendet werden. Karmiloff-Smith betont, dass die Repräsentationen von (E1) nicht notwendigerweise bewusst zugänglich und verbalisierbar sind. Abweichend von der in der Gedächtnispsychologie üblich gewordenen Dichotomie zwischen implizitem und explizitem Wissen, postuliert Karmiloff-Smith auch für explizites Wissen Zwischenstufen, die nicht bewusst zugänglich sind. Auf der Ebene (E2) sind die Repräsentationen bewusst zugänglich, aber nicht notwendigerweise verbalisierbar. Beispielsweise kann räumliches Wissen der Ebene (E1) so auf Ebene (E2) redeskribiert werden, dass es bewusst zugänglich ist, aber nicht verbal, sondern nur mit Hilfe von Zeichnungen expliziert werden kann. Auf der Ebene (E3) wird das Wissen dann so re-repräsentiert, dass nach Karmiloff-Smith ein "cross-system code" entsteht, der hohe Ähnlichkeit mit der natürlichen Sprache besitzt. Linguistische Formen, die ein Kind lernt, können direkt auf (E3) gespeichert werden, wobei Wissen in linguistischer Form von gleichartigem Wissen in non-linguistischer Form getrennt sein kann, z.B. die sprachlich formulierten Regeln der Subtraktion, die aber nicht einen non-verbalen Algorithmus zu beeinflussen brauchen. Karmiloff-Smith fasst aber bei den meisten Anwendungsfällen des RR-Modelles die Ebenen (E2) und (E3) zu (E2/E3) zusammen. Abschließend hebt sie hervor, dass der Prozess der repräsentationalen Redeskription strikt von den dadurch realisierbaren Modellen separiert werden muss. Diese Modelle unterscheiden sich dadurch, ob der Redeskriptionsprozess

streng sequentiell erfolgt (I->E1->E2->E3), ob die Ebene I parallel in E1, E2 oder in einer Kombination aus beiden, z.B. dass I erst in E1 und E1 parallel in E2 und E3, redeskribiert wird.

- Repräsentationale Veränderung der Zählfertigkeit

Nach dem RR-Modell sind die Repräsentationen, die der Numerositätsdiskrimination der Säuglinge und Vorschulkinder zugrunde liegen, der Ebene (I) zugeordnet. Diese Repräsentationen entsprechen Zählprinzipien, d.h. sie können mit Hilfe der Zählprinzipien beschrieben werden, ohne welche zu sein. Dazu gehört die Bildung relativ beliebiger Einheiten, was mit dem Abstraktionsprinzip konform geht und das Indexing, das dem Eins-zu-Eins-Prinzip entspricht. Beide impliziten Repräsentationsmechanismen bieten die Voraussetzung für die Entwicklung des Zählens. Das Indexing erlaubt per Subitizing die schnelle Bildung kleiner Mengen, wodurch schon Säuglinge kleine Numerositäten quantitativ vergleichen können. Mit diesen entwickelten ("fertigen") Prozeduren werden ab dem Alter von ca. 2 Jahren die ersten kurzen Zahlwortsequenzen kombiniert. Schon sehr kleinen Kindern wird manchmal die Zählreihe (z.B. durch Kinderreime) beigebracht, so dass die Kinder das Aufsagen der ersten Zahlworte in der richtigen Reihenfolge routinisieren. Auch diese Fertigkeit ist auf Ebene (I) angesiedelt, denn das Eins-zu-Eins-Prinzip und die Ordinalität, denen die Zählreihe entspricht, sind noch nicht expliziert. Das wiederholte Abzählen einer kleinen Menge auf die Frage nach dem Wieviel zeigt, dass die Kinder noch nicht die einzelnen Elemente der Zählprozedur, die Numeralia, unabhängig voneinander verwenden können, da noch kein Wissen um die Anzahl-Bedeutung jeder einzelnen Zahl vorhanden ist. Allerdings wissen die Kinder schon, dass man die Zählreihe braucht, um die Anzahl einer Menge zu bestimmen. Im RR-Modell bildet das Beenden und damit die letzten "Programmzeilen" einer Prozedur den Ausgangspunkt für die Öffnung der Prozedur und die Verknüpfung mit anderen Prozeduren. Daher wird das zuletzt genannte Zahlwort der Zählreihe bevorzugt im (E1)-Format redeskribiert und zuerst bewusst zugänglich. Durch die wiederholten Endbetonungen unterschiedlich langer Zählprozeduren werden schließlich immer mehr einzelne Zahlwörter einer Zählreihe separat zugänglich. Durch die flexiblere Verwendung einzelner Zahlwörter lernen Kinder das Kardinalitätsprinzip zu verstehen: Jedes Zahlwort kann eine Anzahl bestimmen und das Hinzufügen oder Wegnehmen eines Elementes führt dazu, dass vorangehende oder nachfolgende Zahlwörter verwendet werden müssen. Über die regelhafte Paarung von einzeln verwendbar gewordenen Zählreihenglieder mit systematischen Numerositäten lernen die Kinder Anzahl und die "größer als" bzw. "kleiner als" Relation zu verbinden.

Doch muss nicht nur die Zählprozedur von (I) nach (E1) redeskribiert werden, sondern die Kinder müssen auch verstehen, dass Worte etwas mit Zählen und Klassenbilden zu tun haben können. Zur Benennung einer Klasse von Objekten wird der Name eines Merkmals der Klassenelemente oder der Name der Klassenelemente selbst verwendet, z.B. wenn vier Tassen nicht als "Tasse - Tasse - Tasse - Tasse", sondern als "Tassen" benannt werden. Jedes Element kann also prinzipiell mit dem selben Namen bezeichnet werden wie die Klasse, wobei das Kind durch die korrekte Verwendung von Singular- und Pluralform zeigt, dass es den Unterschied von Einheit und Vielheit versteht. Beim Abzählen ist dies anders: Jedem Element wird ein anderer Name zugeordnet und die Klasse bekommt den "Namen" des zuletzt benannten Elementes. Hinzu kommt, dass beim wiederholten Abzählen andere Zuordnungen von Zahlwörtern und Elementen vorgenommen werden können. Wie schaffen es junge Kinder, die unterschiedlichen linguistischen Inputs auseinander zu halten? Eine wichtige Rolle spielt sicherlich die unterschiedliche Aufgabenstellung, denn es werden jeweils unterschiedliche Fragen

gestellt (“was sind das für Sachen? wie heißen die Sachen hier? Das da ist dasselbe wie das da, also es ist auch ein....?” im Gegensatz zu “wie viele sind das hier?”). Gelman & Cohen (1988) sind der Meinung, dass das angeborene Prinzip der Abfolgeirrelevanz von Elementen und das Prinzip der stabilen Zählreihe linguistisch ermöglicht wird. Meines Erachtens ist eine solche Annahme nicht nötig, da den kleinen Kindern die ersten Zahlworte in ganz bestimmten Situationen vorgesagt werden, die durch die Frage nach dem “Wieviel” kenntlich gemacht werden. Die automatisierte kurze Zählreihe wird nicht aus Versehen oder spontan aufgesagt, wenn man den Kindern Benennungsaufgaben vorgibt.

Allerdings haben die Kinder Schwierigkeiten, Gruppen aus unterschiedlich aussehenden Objekten auf numerische Äquivalenz hin zu vergleichen. Im Rahmen des RR-Modells ist davon auszugehen, dass die Redeskription nur dann einsetzt, wenn eine Fertigkeit ausgebildet ist (“behavioral mastery”). Der Mengenvergleich setzt voraus, dass Kinder die Menge erkennen und auf deren Elemente die Zählreihe anwenden können. Der Übergang auf die Ebene (E1) und (E2) gelingt daher zunächst bei sehr ähnlich aussehenden Elementen, da die Elemente aufgrund ihrer Gleichartigkeit einen gut kontrastierenden Hintergrund für die Unterschiedlichkeit der Zahlworte liefern. Der Unterschied des Abzählens zum Benennen ist auf diese Weise maximal und das Abzählen kann regelgerecht ablaufen. Sind die Elemente sehr unähnlich, dann werden vermutlich die noch nicht auf (E2) entwickelten Benennungsprozeduren mitaktiviert, so dass die Unterschiedlichkeit der Zahlworte mit der Unterschiedlichkeit der Objekte interferiert oder das unterschiedliche Aussehen der Objekte lenkt die Kinder von der Zähl Aufgabe ab.

Die Unterschiedlichkeit der Objekte ist jedoch nicht mit deren Unähnlichkeit gleichzusetzen. Mack & Emrich (i.Vorb.) zeigen, dass deutlich unterschiedlich aussehende, den Kindern aber hoch vertraute Objekte den Effekt der Aussehensunähnlichkeit so abschwächen, dass kein Unterschied mehr zu maximal ähnlichen Objekten auftritt. Schon 3jährige profitieren von dieser Vertrautheit, jedoch deutlich weniger als 4jährige. Die Bekanntheit unterschiedlich aussehender Objekte lässt Benennungsprozeduren oder unwillkürliche Aufmerksamkeit inaktiv und erlaubt daher die Konzentration auf den Mengenvergleich mit Hilfe der Zählreihe. Beherrschen Kinder schließlich die kleine Zählreihe automatisch (E1), dann findet eine Redeskription auf (E2/E3) statt. Die Kinder verstehen die Semantik der Zahlwörter dahingehend, dass sie nicht nur Mächtigkeiten und Mächtigkeitsunterschiede bezeichnen, sondern dass man mit ihrer Hilfe ähnliche Operationen ausführen kann wie mit gegenständlichen Mengen. Zwar haben sie noch kein klares Verständnis der Zahl als Zeichen sowie der Operation mit Zeichen, aber mit Hilfe des zählenden Addierens und Subtrahierens ist der Grundstein zu diesem Verständnis und damit zum Aufbau arithmetischer Konzepte gelegt. Insofern ist das Beherrschen der Zählreihe der Ausgangspunkt für die Bildung und das Verständnis abstrakter arithmetischer Prinzipien.

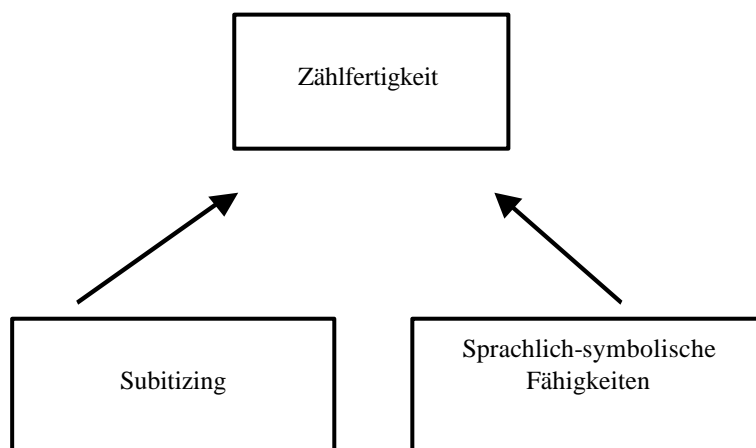
5.5 Entwicklung der Zählfertigkeit: Zur Rolle von Subitizing und sprachlich-symbolischen Fähigkeiten

Welche Rolle spielt Subitizing im Zusammenhang mit der Entwicklung der Zählfertigkeit? Die Annahme, dass Subitizing direkt die Entwicklung der Zählfertigkeit beeinflusst (vgl. Abb. 5-1) erscheint wenig plausibel. Subitizing wurde als Nebenprodukt von Prozessen der Segmentation und Bindung interpretiert, deren Resultat wahrgenommene Einheiten sind. Die Anzahl dieser Einheiten ist aus den in

Kap. 3 genannten Gründen beschränkt. Da der computationalen Wahrnehmungstheorie zufolge die Bildung perzeptiver

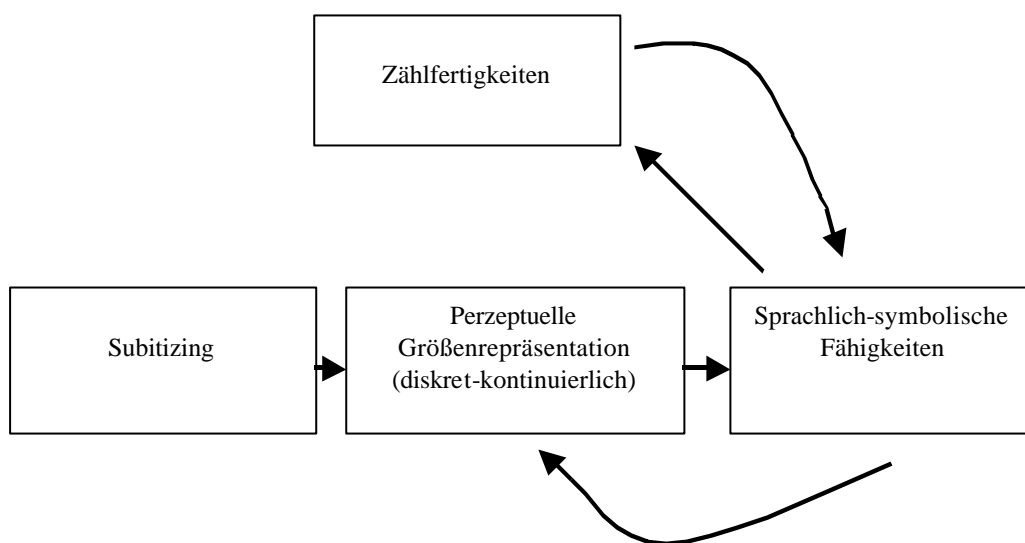
Einheiten rekursiv ist (Marr, 1982), ist es plausibel anzunehmen, dass Subitizing die Individuation kleiner Objektmengen ermöglicht und damit Bestandteil visueller Routinen wie des Markierens ist, welche wiederum Bestandteile des Gruppierens sind. Daher spielt Subitizing sicherlich eine Rolle beim Repräsentieren diskreter Größen wie Mengen im Sinne kleiner Objektkollektionen (vgl. Abb. 5-2). Die simultane Instantiierung mehrerer Objekte ist die Voraussetzung dafür, dass Prozesse wie Gruppieren ablaufen können. Die Individuation von Objekten sowie deren Gruppierung nach gestalttheoretischen Prinzipien ist daher die Grundlage der Anzahlrepräsentation. Die Anzahlrepräsentation ist koextensional mit der Objektrepräsentation, da ohne Objektrepräsentation keine Objektidentität und damit keine Objektdiskrimination möglich ist. Durch die Gruppierung von Objekten können unterschiedliche Gruppen unterschieden werden, auch nach mehr oder weniger, da Gruppen neue Einheiten sind. In der Wahrnehmung umfasst die Repräsentation diskreter Quantitäten folglich die Objektidentität (Objektgenese) oder Objektpermanenz (Meltzoff & Moore, 1998)

Abbildung 5-1. Modell des direkten Zusammenhangs Subitizing - Zählfertigkeit



im Sinne numerischer und qualitativer Identität, das Gruppieren nach gestalttheoretischen Prinzipien sowie die Unterscheidung von “gleich vs ungleich” und “mehr vs weniger”. Diese perzeptiven Kompetenzen sind die Grundlage der Zählfertigkeit, wobei angenommen wird, dass Zählen die Integration dieser Kompetenzen in eine begriffliche Struktur erforderlich macht, die Ausdruck sprachlich-symbolischer Fähigkeiten ist.

Abbildung 5-2. Modell der Entwicklung der Zählfertigkeit



Ohne die perzeptuelle Individuierung von Dingen und Eigenschaften kann auf diese nicht gezeigt und können diese durch Worte, insbesondere Zahlworte nicht benannt werden. Geht man von der entwickelten Zählkompetenz aus, so besteht diese unter anderem im Verständnis, dass beliebige Entitäten gezählt werden können, insofern sie voneinander unterscheidbar sind. Das Zahlensystem ermöglicht es, beliebige Mengen abzuzählen und damit den Bereich von Wahrnehmung und Anschauung zu verlassen, was das Zahlensystem als prototypische konzeptuelle Struktur auszeichnet. Hinzu kommt, dass der Begriff der Struktur erst in der Mathematik seine klarste Bestimmung erfährt. Daher ermöglichen es sprachlich-symbolische Fähigkeiten, die auf kleine Mengen beschränkte exakte Anzahl-repräsentation begrifflich so zu erweitern, dass im Prinzip beliebig grosse Mengen durch Zahlsymbole repräsentiert werden können (vgl. Abb. 5-2). Bei kleinen Mengen dominiert der wahrnehmungsgebundene Mächtigkeitsbezug (anschauliche Mächtigkeits-repräsentation), wohingegen bei größeren Mengen der operative Sequenzbezug dominiert, wie Liddle & Wilkinson (1987) in einer Längsschnittstudie mit 1 bis 3jährigen Kindern fanden. Große Anzahlen können nur noch konzeptuell repräsentiert werden. Schon Descartes wies auf die Diskrepanz von Anschauung und Begriff im Zusammenhang mit großen Anzahlen hin und führte als Beispiel an, dass sich niemand ein Tausendeck vorstellen kann, aber der Begriff des Tausendeckes begrifflich klar konstruierbar ist. Vor allem kann das Tausendeck nicht anschaulich beispielsweise von einem Zehntausendeck unterschieden werden, aber sehr wohl begrifflich (Descartes, 1972).

Eine wesentliche Rolle in der Entwicklung zu diesem abstrakten Zahlkonzept spielt der Erwerb des Verständnisses des Unterschiedes von Zeichen und Bezeichnetem (z.B. Becker & Varelas, 1993). Die Zahlworte werden als abstrakte, unbenannte Namen für Mengen verstanden. Daher ist eine der kritischsten entwicklungspsychologischen Fragen, ob Kinder in diesem Alter Zahlworte überhaupt mit deren numerischen Bedeutung verwenden (Becker & Varelas, 1993).

Vorschulkinder ab ca. 2 Jahre bis zu 3 Jahren hingegen verwenden Zahlworte als benannte, konkrete, als Namen einzelner Objekte, und dies trotz des Umstandes, dass sie in der Lage sind, die ersten Zahlworte der Zählreihe aufzusagen (z.B. Fuson, 1988; Wynn, 1992b). Diese Zählreihe ist jedoch vom

Typ des impliziten Wissens, eine geschlossene Prozedur, die (noch) nicht aufgebrochen werden kann (vgl. Kap. 5.4). Die zentrale entwicklungspsychologische Frage ist, wie Kinder lernen, dass Zahlworte sich auf Eigenschaften einer Menge von Entitäten beziehen und nicht auf Eigenschaften einer Entität. Wynn (1992b) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Vorschulkinder auch schon größere Zahlwörter kennen und wissen, dass man Zahlwörter zur Bezeichnung von Mengen verwendet. Allerdings wissen sie nicht, welche Menge durch dieses Zahlwort bezeichnet wird. Dieser Befund konfligiert mit der Auffassung angeborener Zählprinzipien, da die Vorschulkinder dieser Auffassung nach den Zusammenhang von Zahlwort und Menge kennen. Vorschulkinder scheinen gleichzeitig zu wissen, dass (a) auch die größeren Zahlwörter sich auf Numerositäten beziehen, (b) wobei sie nicht wissen, auf welche Numerositäten diese Zahlwörter anzuwenden sind und dies, obwohl sie (c) die Position des Zahlwortes in der Zählreihe kennen. Die Herausforderung für die Zählprinzipientheorie nach Gelman & Gallistel (1978) besteht darin, dieses Wissen zu erklären. Denn (a) und (b) sollten (c) ausschließen, da die Position des Zahlwortes in der Zählreihe dessen numerische Bedeutung bestimmt. Das gemeinsame Auftreten von (b) und (c) könnte bedeuten, dass die Kinder das semantische System der Zahlworte nicht verstehen. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass wohl Subitizing einen förderlichen Einfluss auf die Zählfertigkeit hat, da die Kinder die Semantik der Zahlworte am Beginn der Zählreihe zuerst verstehen lernen. Da beispielsweise eine 3er Gruppe immer mit dem Wort "drei" bezeichnet wird, kann das Kind generalisieren, dass Zahlworte dazu dienen, Gruppen als Einheiten zu bilden und zu bezeichnen und nicht Namen für einzelne Objekte sind. Über das Verständnis der kleinen Zahlworte verändert sich schließlich das pre-counting Subitizing in ein post-counting Subitizing, da analog repräsentierte kleine Mengen benannt werden können (vgl. Abb. 5-6).

Eine wichtige Rolle für die Entwicklung des semantischen Zahlwortverständnisses scheint die Syntax der Zahlworte zu spielen, die Quantitäten anzeigt. Unbestimmte Artikel wie "ein" und Partikel wie "alle", "beide", "viel", "wenig" sind intrinsisch mit quantititätsanzeigenden Handlungen und Redeweisen verbunden. Vorschulkinder verwenden sehr häufig "ein" oder "eine" und verwenden damit ein sprachgestütztes objektindividuiendes Benennen, das zusammen mit anderen Partikeln intrinsisch mit sprachbasierter Quantifizierung verbunden ist. Es gibt eine Reihe von Befunden, dass Vorschulkinder desweiteren sensitiv für die syntaktischen Regeln sind, die die Verwendung von Artikeln und Quantifikatoren steuern (vgl. Wynn, 1992b). Ebenso beachten sie die Semantik der singular- und pluralanzeigenden Semantik der Artikel (z.B. Soja, Carey, & Spelke, 1991) und lernen damit sprachbasiertes Quantifizieren. Schließlich ist zu bedenken, dass der Umgang mit Sprache eine soziale, kognitive Praxis ist, über die Kinder begriffliche Relationen erwerben (Wygotsky, 1978; Nolan, 1994). Ähnliches gilt für das Erlernen dessen, dass jedes Zahlwort eine bestimmte Numerosität bezeichnet. So lernen Kinder im Alltagskontext, dass Zahlworte nicht auf Substanzen, sondern auf individuierbare Entitäten angewandt werden. Entsprechend erfahren Kinder in bestimmten Kontexten, dass "mehr" und "weniger" genauer bestimmt werden können, z.B. in dem Falle, dass einem Kind nicht vier, sondern drei Bonbons zugesprochen werden und es ein Bonbon zurückgeben muss. Durch solche kontrastive Kontexte lernen schon die Vorschulkinder die Besonderheiten der semantischen Klasse "Zahlworte" und lernen die Frage nach dem "Wieviel" zu verstehen (vgl. Fuson, 1988; Wynn, 1992b).

Sophian (1996) betont, dass der Erwerb des verbalen Zahlsystems eine völlig neue Weise des Repräsentierens von Anzahlen und Zahlen sei. Diese Feststellung bestätigt generellere Annahmen darüber, dass mentale Entwicklung im Umschreiben und Erweitern des repräsentationalen Systems besteht (Karmiloff-Smith, 1992; Carey, 1991). Die Entwicklungsaufgabe der Vorschulkinder besteht

darin, das Positionsprinzip der verbalen Zählreihe mit den dazu passenden Mächtigkeiten zu koordinieren. Die Positionen der Zählreihe sind ordinal und jeder ordinalen Position entspricht eine und nur eine Kardinalität. Folglich setzt die Beherrschung der Zählreihe das Verständnis von Ordinalität, Kardinalität und deren Zusammenhang voraus bzw. dieses Verständnis wird über das Üben der Zählreihe gelernt. Die logische Seite des Verständnisses, dass sich Mächtigkeiten zu Äquivalenzklassen und Äquivalenzklassen seriell ordnen lassen wurde von Piaget (1972) hervorgehoben, allerdings hat Piaget die sprachliche Fertigkeit des Zählens als ein Kernstück der kognitiven Genese des Zahlbegriffs beim Kinde deutlich unterschätzt. Jedoch ist Piaget darin zuzustimmen, dass nicht nur das logische Zahlkonzept, sondern auch die Zählfertigkeit in der Anzahlinvarianz wurzeln, welche wiederum auf Prozessen des Segmentierens und Binding beruht. Entsprechend beruht die Fähigkeit der Säuglinge, Anzahlen zu unterscheiden nicht auf Repräsentationen, die ähnlich wie die natürlichen Zahlen zu verstehen sind, sondern auf solchen, die mit dem object-file oder dem FINST-Modell beschrieben werden können (Xu & Carey, 1996; Leslie et al., 1998; Uller, Carey, Huntley-Fenner, & Klatt, 1999).

5.6 Resümee

Zählen und Subitizing

Die grundlegenden Voraussetzungen der Zählkompetenz sind die Fähigkeiten, zählbare Einheiten bilden und indizieren zu können. Einheiten werden nicht gebildet, um zu zählen, sondern diese ermöglichen dem Organismus den Aufbau einer Umgebungsrepräsentation und somit adaptives Verhalten. Über diese repräsentationale Fähigkeit verfügen alle Organismen, allerdings in unterschiedlicher Ausprägung. Begründet liegt diese Fähigkeit in der biophysikalischen Struktur eines Organismus, da dieser zu einem definierten Zeitpunkt nicht alle Informationen seiner Umgebung gleichwertig berücksichtigen kann. Die anisotrope Struktur der Sinnes- und Motosysteme (die nach Fodor (1983) aus relativ autonomen psychophysischen Modulen besteht) erlaubt zu einem Zeitpunkt die Berücksichtigung nur weniger Informationseinheiten. Die Analyse der Umgebungseinheiten wird fortlaufend mit vorausgegangenen verglichen und bei Fehlpassungen finden Re-Analysen und Re-Synthesen statt. Auf diesen Analyse-durch-Synthese-Prozessen bauen komplexere psychische Strukturen wie das Gedächtnis auf (Neisser, 1967; Piaget, 1983). Segmentations- und Bindungsprozesse der Wahrnehmung sind Instanzen solcher Analyse-durch-Synthese-Prozesse, die zur Bildung von Objekt- und Ereignisprimitiven führen, aus denen Objekte, Szenen, Rhythmen, Melodien und Sprechmuster hergestellt werden. Die Experimente zum Phänomen Subitizing bestätigen die Auffassung, dass Subitizing nicht als Zählen im Sinne der hochroutinisierten Anwendung von Abzählfertigkeiten zu interpretieren ist. Dass die Numerositäten von bis zu 4 Elementen sehr schnell und fehlerarm erfasst werden können, lässt sich nur als Vorgang der frühen Merkmalsanalyse im visuellen System erklären. Modelle des Subitizing wie FINST (Trick & Pylyshyn, 1993; 1994a, b) oder das object-file-Modell, die sich unter der Indexing-Hypothese (Leslie et al., 1998) subsumieren lassen, verdeutlichen, dass Objektprimitive indiziert werden müssen, damit weitere synthetisierende visuelle Routinen die Primitive zu Objekten zusammensetzen können. Bestätigt wird diese Erklärung des Subitizing als Resultante von Wahrnehmungsmechanismen durch die Experimente und v.a. der Altersinvarianz der Befunde. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass *Subitizing ein eigenständiger Prozess ist, der sich als Resultat von Segmentations- und Bindungsprozessen in frühen Phasen*

der visuellen Informationsverarbeitung ergibt. Daher ist Subitizing nicht als Ausdruck numerischer Kompetenz zu interpretieren. Dadurch wird keineswegs ausgeschlossen, dass Subitizing bzw. die zugrunde liegenden Mechanismen eine wichtige Rolle im Erwerb von Zählfertigkeiten spielen. Hochspezialisierte neurokognitive Systeme, die biologisch primären Fähigkeiten zugrunde liegen, können für andere Zwecke Verwendung finden als für die durch die Evolution selektierten. Diese in gewissen Grenzen vorhandene funktionelle Offenheit biologischer Primärfertigkeiten ist schließlich die Grundlage der Ausbildung kulturell vermittelter Fertigkeiten (vgl. die Überlegungen von Geary (1995), der diese als “biologically secondary forms of cognition” bezeichnet, aber auch Piaget, 1983).

Numerische Kompetenz von Säuglingen

Eine Reihe von Studien zeigte, dass Säuglinge schon im ersten Lebenshalbjahr kleine Numerositäten unterscheiden können. Diese Befunde wurden als Hinweise darauf interpretiert, numerische Kompetenzen angeboren. Da diese anzahlbezogene Sensitivität der Säuglinge vor allem bei kleinen Numerositäten festgestellt wurde, kann dies alternativ dadurch erklärt werden, dass sie keine numerische Kompetenz, sondern Ergebnis des dem Subitizing zugrundeliegenden Mechanismus ist.

Säuglinge mit einem mittleren Alter von 7 Monaten diskriminierten 2 von 3, 3 von 4, aber nicht 4 von 6 und 4 von 5 Elementen. Diese Diskriminationsleistungen lassen sich als pre-counting-Subitizing interpretieren. Einige Studien konnten zeigen, dass Säuglinge auch größere Numerositäten diskriminieren können, die sich allerdings mindestens 50% unterscheiden müssen. Die hier berichteten Experimente, in denen Tonsequenzen verwendet wurden, ergaben Vergleichbares: Säuglinge können 2 von 3 Tönen, aber nicht 4 von 6 Tönen unterscheiden. Anders als in der visuellen Modalität können sie Tonsequenzen nicht unterscheiden, deren Anzahl sich um 50% unterscheidet. Möglicherweise sind in der auditiven Modalität andere Mechanismen der Bindung und Segmentation wirksam. *Für die visuelle Domäne ist von zwei unterschiedlichen Mechanismen der Anzahldiskrimination auszugehen. Im Bereich kleiner Numerositäten ist die Diskriminationsleistung als Subitizing und nicht als numerische Kompetenz zu verstehen. Im Bereich größerer Numerositäten lässt sich das Diskriminationsverhalten der Säuglinge wie die Mengendiskrimination bei Erwachsenen mit dem Weber-Fechner Gesetz beschreiben:* Den Diskriminationen von Mengen liegen approximative Repräsentationen zugrunde, die auf Aspekten wie Kontrast, belegte Fläche, Subgruppen etc. beruhen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Eins-zu-Eins-Zuordnung der Elemente beider Diskriminanda und damit Zählprinzipien angewandt werden. Die Annahme, Säuglinge wendeten bereits angeborene Zählprinzipien an, lässt sich durch die sparsamere Annahme ersetzen, dass Säuglinge Numerositäten nach “gleich” vs “ungleich” unterscheiden. Numerositäten sind somit keine spezifischen Diskriminanda, sondern werden unterschieden wie andere Instanzen der Dimensionen der Wahrnehmungswelt. Die Diskriminationsleistungen auf der Dimension gleich vs ungleich erlauben die Bildung von Äquivalenzklassen nach dem Prinzip der Ununterscheidbarkeit. Größere Numerositäten aktivieren die Dimension “Menge-Einheit”, kleine Numerositäten erlauben die Individuierung einzelner Elemente und aktivieren die Dimension “Objekt-Einheit”. Die Objekt Konstanz, also das Erkennen von numerisch und qualitativ identischen Objekten im Sinne von Objektidentität und Objektpermanenz (Meltzoff & Moore, 1998) ist eine grundlegende Voraussetzung der numerischen Kompetenz, die sich ebenfalls als Äquivalenzklassenbildung und damit Abstraktion konzeptualisieren lässt: Das Erkennen eines sich verändernden Objektes als eines und das selbe, lässt sich als Äquivalenzklasse vermittelt

über Identitätserhaltenden Transformationen verstehen. Geben die Transformationen Anlass, von zwei Objekten auszugehen, so findet eine Unterscheidung in mindestens zwei Objektklassen statt. Die Anzahl als klassenbildende Eigenschaft wird jedoch nicht abstrahiert, sondern, wie bei der Identität eines Objektes die Anzahl 1 mit dem Objekt identisch ist, ist auch die Anzahl 2 oder 3 oder 4 mit den Objekten identisch.

Säuglinge haben also ein Perzept von Einheit, Zweiheit und Dreiheit unabhängig von Sprache und Zählen. Diese Kompetenz ist eng verknüpft mit dem nominalen, klassifizierenden Aspekt der Zahl, mit Identität und Non-Identität von Objekten und Ereignissen. Berücksichtigt man die Gebrauchssemantik des Wortes "Zählen", wird man eine reine Eins-zu-Eins-Korrespondenzprüfung nicht als Zählen bezeichnen, da die Frage nach dem Wieviel nicht beantwortet werden kann. Man kann beispielsweise nur sagen, dass es genauso viele Äpfel wie Birnen gibt bzw. dass mehr oder weniger Äpfel als Birnen vorhanden sind. Subitizing ist ein vergleichbarer Vorgang, da eine kleine Menge von Objekten oder Ereignissen mit einer kleinen Menge von raumzeitlichen Deskriptoren verknüpft wird, ohne den kardinalen Wert zu bestimmen. Eine fixe Anordnung von Marken (Numerons) impliziert nicht notwendigerweise den ordinalen und operativen Aspekt der Zahl. Man weiß nicht, wie man von einer Kardinalzahl zur nächsten kommt, wenn die Operation des Inkrementierens mit einer definierten Einheit und damit die Relationen zwischen den Zahlen nicht allgemeingültig eingeführt sind. Man kann die Zahl nicht auf Äquivalenzrelationen oder die Kardinalität reduzieren. Vielmehr ist die Zahl ein Konzept im Rahmen einer arithmetischen Theorie, die implizit beim Zählen gebraucht wird. *In diesem Sinne sind numerische Kompetenzen von Tieren und Säuglingen prä-arithmetisch, da sie nur die Äquivalenzrelation umfassen, d.h. die "gleich - ungleich" und "mehr-weniger" Unterscheidungen und die Repräsentation von Numerositäten (Objekte, Ereignisse). Die Repräsentation von Numerositäten sollte aber nicht mit der Repräsentation des Zahlbegriffs gleichgesetzt werden.*

Entwicklung der Zählkompetenz

Die numerische Kompetenz von Säuglingen lässt sich als perzeptuelle Sensitivität für Anzahlunterschiede kennzeichnen, wobei kleine Anzahlen als Gruppe von Objekten individuiert sowie Objekte und Anzahl nicht unterschieden werden. Zu diesem Zwecke reichen approximative Repräsentationen aus. Die Zählkompetenz entwickelt sich auf der Basis der Erkenntnis, dass die Anzahl eine Klasse von beliebigen Elementen bezeichnet. Dies macht den Aufbau höherstufiger Repräsentationen, nach Piaget reflexive Abstraktion, erforderlich, um die Wahrnehmungsgelassenheit beim Mengenvergleich zu überwinden. Studien mit Kindern um 3 Jahre zum non-verbalen, perzeptiven Vergleich kleiner Mengen auf numerische Äquivalenz hin zeigten, dass sich die Kinder noch sehr stark vom Aussehen der Vergleichsobjekte beeinflussen lassen. Ähnliche Befunde gibt es aus dem Bereich Klassenbildung. Kinder in diesem Alter haben generell Schwierigkeiten, abstrakte Eigenschaften zur Klassenbildung heranzuziehen. Im Bereich der numerischen Domäne sollte dies nicht der Fall sein, könnten Kinder die Zählprinzipien anwenden. Einen wesentlichen Fortschritt beim Abzählen unterschiedlichster Objekte machen die Kinder zwischen dem 4ten und 5ten Lebensjahr, wenn sie nicht nur die verbale Zählreihe beherrschen, sondern ein gewisses Verständnis der Kardinalität erreicht haben. Sie verstehen dann, dass eine Zahl ein Namen für eine Äquivalenzklasse von Objekten ist, die in einer bestimmten Beziehung zu anderen Anzahlen steht. Dieses Verständnis hängt eng mit dem Meistern des verbalen Abzählens zusammen. Anfangs gelingt

dies nur bei kleinen Objektmengen fehlerfrei, hier dürfte Subitizing einen förderlichen Effekt beim Erlernen der Regeln des Abzählens haben. Die Bedeutung der verbalen Zählfertigkeit beim Erwerb des kardinalen und ordinalen Zahlaspektes wurde allerdings von Piaget unterschätzt. Diese Zusammenhänge und vor allem der Umstand, dass ähnliche Performanzen auf unterschiedlichen Kompetenzen beruhen sowie implizites wahrnehmungsgebundenes Wissen in abstraktes, situationsunabhängig kombinierbares explizites Wissen "umgeschrieben" wird, lassen sich gut mit dem Modell der Repräsentationalen Redeskription Karmiloff-Smiths beschreiben. Es ist davon auszugehen, dass sich die unterschiedlichen Aspekte des Zahlbegriffs nicht synchron entwickeln, wobei mit differentiellen Entwicklungsverläufen zu rechnen ist.

Literatur

- Akin, O. & Chase, W. (1978). Quantification of three-dimensional structures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 397-41.
- Allik, J. & Tuulmets, T. (1991). Occupancy model of perceived numerosity. *Perception and Psychophysics*, 49, 303-314.
- Antell, S. E. & Keating, D. P. (1983). Perception of numerical invariances in neonates. *Child Development*, 54, 695-701.
- Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, 44, 75-106.
- Atkinson, J., Campbell, F. W., & Francis, M. R. (1976). The magic number 4 + 0: A new look at visual numerosity judgements. *Perception*, 5, 327-334.
- Atkinson, J. & Braddick, O. J. (1989). 'Where' and 'what' in visual search. *Perception*, 18, 181-189.
- Baillargeon, R. (1987). Object permanence in 3 1/2 and 4 1/2-month-old infants. *Developmental Psychology*, 23, 655-664.
- Baillargeon, R., & Graber, M. (1987). Where's the rabbit? 5.5-month-old infants' representation of the height of a hidden object. *Cognitive Development*, 2, 375-392.
- Baillargeon, R. (1993). The object concept revisited: New directions in the investigation of infants' physical knowledge. In C. E. Granrud (Hrsg.), *Visual perception and cognition in infancy* (S. 265-315). Hillsdale, NJ: LEA.
- Baillargeon, R. (1995). A model of physical reasoning in infancy. In C. Rovee-Collier & L. Lipsitt (Hrsg.), *Advances in infancy research* (Bd. 9, S. 305-371). Norwood, N.J.: Ablex.
- Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., Pook, P. K., & Rao, R. P. N. (1997). Deictic codes for the embodiment of cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 723-767.
- Baroody, A. J. (1992). The development of preschoolers' counting skills and principles. In J. Bideaud, C. Meljac, & J.-P. Fischer (Hrsg.), *Pathways to number. Children's developing numerical abilities* (S. 99-126). Hillsdale, NJ: LEA.
- Baltes, P. B. (1990). Entwicklungspsychologie der Lebensspanne: Theoretische Leitsätze. *Psychologische Rundschau*, 41, 1-24.
- Balakrishnan, J. D. & Ashby, F. G. (1991). Is subitizing a unique numerical ability? *Perception & Psychophysics*, 50, 555-564.
- Balakrishnan, J. D. & Ashby, F. G. (1992). Subitizing: Magical number or mere superstition? *Psychological Research*, 54, 80-90.
- Beck, J. (1982). Textural segmentation. In J. Beck (Hrsg.), *Organization and representation in perception* (S. 285-317). Hillsdale, NJ: LEA.
- Becker, J. & Varelas, M. (1993). Semiotic aspects of cognitive development: Illustrations from early mathematical cognition. *Psychological Review*, 100, 420-431.
- Benasich, A. A. & Tallal, P. (1996). Auditory temporal processing thresholds, habituation, and recognition memory over the 1st year. *Infant Behavior and Development*, 19, 339-357.
- Berlyne, D. E. (1958). The influence of the albedo and complexity of stimuli on visual fixation in the human infant. *British Journal of Psychology*, 49, 315-318.
- Berthenthal, B. I., & Clifton, R. K. (1998). Perception and action. In W. Damon, D. Kuhn, & R. S. Siegler (Hrsg.), *Handbook of Child Psychology, Vol.2: Cognition, Perception and Language* (5th ed., S. 51-102). New York: Wiley.

- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94, 115-147.
- Bijeljac-Babic, R., Bertocini, J., & Mehler, J. (1993). How do 4-day-old infants categorize multisyllabic utterances? *Developmental Psychology*, 29, 711-721.
- Bischof, N. (1995). *Struktur und Bedeutung. Eine Einführung in die Systemtheorie*. Bern etc.: Huber.
- Blass, E. M., Ganchrow, J. R., & Steiner, J. E. (1984). Classical conditioning in newborn humans 2-48 hours of age. *Infant Behavior and Development*, 7, 223-235.
- Block, R. A. & Zakay, D. (1996). Models of psychological time revisited. In H. Helfrich (Hrsg.), *Time and mind* (S. 171-195). Seattle: Hogrefe.
- Bornstein, M. H. (1984). A descriptive taxonomy of psychological categories used by infants. In C. Sophian (Hrsg.), *The origin of cognitive skills* (S. 313-338). Hillsdale, NJ: LEA.
- Bornstein, M. H. (1985). Habituation of attention as a measure of visual information processing in human infants: Summary, systematization, and synthesis. In G. Gottlieb & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Measurement of Audition and Vision in the first year of postnatal life: A methodological overview* (S. 253-300). Norwood, NJ: Ablex.
- Bower, T. G. R. (1966). The visual world of infants. *Scientific American*, 215, 80-92.
- Bower, T. (1978). *Die Wahrnehmungswelt des Kindes*. Stuttgart: Klett.
- Bower, T. G. R. (1982). *Development in infancy (2nd ed.)*. San Francisco: Freeman & Co
- Brainerd, C. (1974). Training and transfer of transitivity, conservation, and class inclusion of length. *Child Development*, 45, 324-334.
- Braitenberg, V. (1993). *Vehikel. Experimente mit kybernetischen Wesen (Orig. 1984, Vehicles: Experiments in synthetic psychology)*. Reinbek b. Hamburg: Rowohlt.
- Briars, D. & Siegler, R. S. (1984). A featural analysis of preschoolers' counting knowledge. *Developmental Psychology*, 20, 607-618.
- Bromme, R. (1985). Aufgaben- und Problemanalyse bei der Untersuchung des problemlösenden Denkens. In G. Jüttemann (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 259-281). Weinheim, Basel: Beltz.
- Bryant, P. & Trabasso, T. (1971). Transitive inferences and memory in young children. *Nature*, 232, 456-458.
- Bühler, K. (1934). *Sprachtheorie. Die Darstellungsfunktion der Sprache*. Jena: Fischer.
- Campbell, J. I. D. (1994). Architectures for numerical cognition. *Cognition*, 53, 1-44.
- Canfield, R. L., Smith, E. G., Brezsnayak, M. P., & Snow, K. L. (1997). Information processing through the first year of life: A longitudinal study using the visual expectation paradigm. In *Monographs of the Society for Research in Child Development* (Serial No. 250, Vol. 62(2)). Chicago: University of Chicago Press.
- Capaldi, E. J. & Miller, D. J. (1988). Counting in rats: Its functional significance and the independent cognitive processes which comprise it. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14, 3-17.
- Carey, S. (1991). Knowledge acquisition: Enrichment or conceptual change? In S. Carey & R. Gelman (Hrsg.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition* (S. 257-291). Hillsdale, NJ: LEA.
- Caron, R. F. (1967). Visual reinforcement of head-turning in young infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, 5, 489-511.

- Chapman, M., & Lindenberger, U. (1992a). How to detect reasoning-remembering dependence (and how not to). *Developmental Review*, *12*, 187-198.
- Chapman, M., & Lindenberger, U. (1992b). Transitivity judgments, memory for premises, and modes of children reasoning. *Developmental Review*, *12*, 124-163.
- Cheour, M., Leppanen, P.-H., & Kraus, N. (2000). Mismatch negativity (MMN) as a tool for investigating auditory discrimination and sensory memory in infants and children. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 4-16.
- Cheatham, P. G. & White, C. T. (1954). Temporal numerosity: III. Auditory perception of number. *Journal of Experimental Psychology*, *47*, 425-428.
- Cohen, L. B. (1991). Infant attention: An information processing approach. In M. J. S. Weiss & P. R. Zelazo (Hrsg.), *Newborn attention: Biological constraints and the influence of experience* (S. 1-21). Norwood, N.J.: Ablex.
- Cohen, L. B., DeLoache, J. S., & Rissman, M. W. (1975). The effect of stimulus complexity on infant visual attention and habituation. *Child Development*, *46*, 611-617.
- Cohen, L. B. & Salapatek, P. (eds.). (1975a). *Infant perception: From sensation to cognition. Vol. I: Basic visual processes*. New York: Academic Press.
- Cohen, L. B. & Salapatek, P. (eds.). (1975b). *Infant perception: From sensation to cognition. Vol. II: Perception of space, speech, and sound*. New York: Academic Press.
- Colombo, J. (1993). *Infant cognition: Predicting later intellectual functioning*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Colombo, J., & Horowitz, F. D. (1985). A parametric study of the infant control procedure. *Infant Behavior and Development*, *8*, 117-121.
- Colombo, J., & Mitchell, D. W. (1990). Individual differences in early visual attention: Fixation time and information processing. In J. Colombo & J. W. Fagan (Hrsg.), *Individual differences in infancy* (S. 193-228). Hillsdale, NJ: LEA.
- Colombo, J., Ryther, J. S., Frick, J. E., & Gifford, J. J. (1995). Visual pop-out in infants: Evidence for pre-attentive search in 3- and 4-month-olds. *Psychonomic Bulletin & Review*, *2*, 266-268.
- Cooper, R. G., Jr. (1984). Early number development: Discovering number space with addition and subtraction. In C. Sophian (Hrsg.), *Origins of cognitive skills* (S. 157-192). Hillsdale, NJ: LEA.
- Cramér, H. (1946). *Mathematical methods of statistics*. Princeton: Princeton Univ. Press.
- Cummins, R. (2000). "How does it work?" versus "What are the laws?": Two conceptions of psychological explanation. In F. C. Keil & R. A. Wilson (Hrsg.), *Explanation and Cognition* (S. 117-144). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Damerow, P. (1994). Vorüberlegungen zu einer historischen Epistemologie der Zahlbegriffsentwicklung. In G. Dux & U. Wenzel (Hrsg.), *Der Prozeß der Geistesgeschichte. Studien zur ontogenetischen und historischen Entwicklung des Geistes* (S. 248-322). Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Dantzig, T. (1954). *Number: The language of science (4th ed.)*. New York: Free Press.
- Davis, H. & Pérusse, R. (1988). Numerical competence in animals: Definitional issues, current evidence, and a new research agenda. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*, 561-615.
- Dawkins, M. S. (1994). Die Entdeckung des tierischen Bewusstseins (Orig. 1993). Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Descartes, R. (1972). *Meditationen über die Grundlagen der Philosophie*. Hamburg:Meiner.

- DeCasper, A. J. & Spence, M. J. (1986). Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds. *Infant Behavior and Development*, 9, 133-150.
- Dehaene, S. (1989). The psychophysics of numerical comparison: A reexamination of apparently incompatible data. *Perception & Psychophysics*, 45, 557-566.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital: Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene, S. & Changeux, J.-P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 390-407.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1994). Dissociable mechanisms of subitizing and counting: Neuropsychological evidence from simultanagnosia patients. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 958-975.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. New York etc.: Oxford Univ. Press.
- DeLoache, J. S. (1989). The development of representation in young children. In H. W. Reese (Hrsg.), *Advances in child development and behavior* (Bd. 22, S. 1-39). New York: Academic Press.
- Demany, L. (1982). Auditory stream segregation in infancy. *Infant Behavior and Development*, 5, 261-276.
- Descouedres, A. (1914). Couleur, forme ou nombre? *Archives de Psychologie*, 14, 305-341.
- Diamond, A. (1985). Development of the ability to use recall to guide action as indicated by infants' performance on AB. *Child Development*, 56, 868-883.
- Edelman, S. (1998). Representation is representation of similarities. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 449-498.
- Elman, J. L., Bates, E. A., Johnson, M. H., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness. A connectionist perspective on development*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Eriksen, C. W. & Hoffman, J. E. (1972). Temporal and spatial characteristics of selective encoding from visual displays. *Perception & Psychophysics*, 12, 201-204.
- Eriksen, C. W. & Hoffman, J. (1973). The extent of processing noise elements during selective encoding of visual displays. *Perception and Psychophysics*, 14, 155-160.
- Eriksen, C. W. (1980). The use of a visual mask may seriously confound your experiment. *Perception and Psychophysics*, 28, 89-92.
- Fagan, J. F. (1973). Infants' delayed recognition memory and forgetting. *Journal of Experimental Child Psychology*, 16, 424-450.
- Fagan, J. F. (1988). Evidence for the relationship between responsiveness to visual novelty during infancy and later intelligence. *European Bulletin of Cognitive Psychology*, 8, 469-475.
- Fantz, R. L. (1958). Pattern vision in young infants. *Psychological Record*, 8, 43-49.
- Fantz, R. L. (1964). Visual experience in infants: decreased attention to familiar patterns relative to novel ones. *Science*, 146, 668-670.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Hartel.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

- Fodor, J. A. (1985). Erklärungen in der Psychologie (Original 1964). In A. Beckermann (Hrsg.), *Analytische Handlungstheorie, Bd. 2: Handlungserklärungen* (S. 412-434). Frankfurt: Suhrkamp.
- Frege, G. (1894). Ausführungen über Sinn und Bedeutung. In Gabriel, G. (1978), *Gottlob Frege: Schriften zur Logik und Sprachphilosophie. Aus dem Nachlaß* (S. 25-34). Hamburg: Meiner.
- Frick, R. (1987). The homogeneity effect in counting. *Perception and Psychophysics*, *41*, 8-16.
- Fuson, K. C. (1988a). Some further clarifications of numerical terminology using results from young children. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*, 583-585.
- Fuson, K. C. (1988b). *Children's counting and concept of number*. New York etc.: Springer.
- Fuson, K. C. (1992). Relationships between counting and cardinality from age 2 to age 8. In J. Bideaud, C. Meljac, & J.-P. Fischer (Hrsg.), *Pathways to number. Children's developing numerical abilities* (S. 127-149). Hillsdale, NJ: LEA.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1991). Subitizing: The preverbal counting process. In W. Kessen, A. Ortony, & F. Craik (Hrsg.), *Festschrift for George Mandler* (S. 65-81). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gallistel, C. R. & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, *44*, 43-74.
- Garner, W. R. (1951). The accuracy of counting repeated short tones. *Journal of Experimental Psychology*, *41*, 310-316.
- Gast, H. (1954). Zur Frage der Mengenunterscheidung bei 3-8-jährigen Kindern. *Zeitschrift für Psychologie*, *157*, 106-138.
- Gast, H. (1957). Der Umgang mit Zahlen und Zahlgebilden in der frühen Kindheit. *Zeitschrift für Psychologie*, *161*, 1-90.
- Geary, D. C. (1995). Reflections of evolution and culture in children's cognition. Implications for mathematical development and instruction. *American Psychologist*, *50*, 24-37.
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Gelman, R. & Cohen, M. (1988). Qualitative differences in the way Down's syndrome and normal children solve a novel counting problem. In L. Nadel (Hrsg.), *The psychobiology of Down's syndrome* (S. 51-99). Cambridge, MA: MIT Press.
- Gelman, S. A. & Markman, E. M. (1987). Young children's inductions from natural kinds: The role of categories and appearances. *Child Development*, *58*, 1532-1541.
- Gentner, D. (1988). Metaphor as structure mapping: The relational shift. *Child Development*, *59*, 47-59.
- Gentner, D. & Rattermann, M. J. (1991). Language and the career of similarity. In S. A. Gelman & J. P. Byrnes (Hrsg.), *Perspectives on language and thought: Interrelations in development* (S. 225-277). London: Cambridge University Press.
- Gentner, D., Rattermann, M. J., Markman, A., & Kotovsky, L. (1995). Two forces in the development of relational similarity. In T. J. Simon & G. S. Halford (Hrsg.), *Developing cognitive competence: New approaches to process modelling* (S. 263-313). Hillsdale, NJ: LEA.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectance theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, *84*, 279-325.

- Gibbon, J. (1991). Origins of scalar timing. *Learning and Motivation*, 22, 3-38.
- Gillan, D. J. (1981). Reasoning in the chimpanzee: II. Transitive inference. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7, 150-164.
- Glaserfeld, E. v. (1982). Subitizing: The role of figural patterns in the development of numerical concepts. *Archives de Psychologie*, 50, 191-218.
- Glaserfeld, E. v. & Richards, J. (1983). The creation of units as a prerequisite for number: A philosophical review. In L. P. Steffe, E. Glaserfeld, J. Richards, & P. Cobb (Hrsg.), *Children's counting types*. New York: Praeger.
- Glezer, V. D., Ivanoff, V. A., & Tscherbach, T. A. (1973). Investigation of complex and hypercomplex receptive fields of visual cortex as spatial frequency filters. *Vision Research*, 13, 1875-1904.
- Gold, R. S. (1987). *The description of cognitive development: Three Piagetian themes*. Oxford: Oxford University Press.
- Goldstone, R. L. (1994). The role of similarity in categorization: providing a groundwork. *Cognition*, 52, 125-157.
- Gottlieb, G. & Krasnegor, N. A. (Hrsg.). (1985). *Measurement of audition and vision in the first year of postnatal life: A methodological overview*. Norwood, NJ: Ablex.
- Graham, F. K. (1992). Attention: The heartbeat, the blink, and the brain. In B. A. Campbell, H. Hayne, & R. Richardson (Hrsg.), *Attention and Information processing in infants and adults. Perspectives from human and animal research* (S. 3-29). Hillsdale, NJ: LEA.
- Granrud, C. E., & Yonas, A. (1984). Infants' perception of pictorially specified interposition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 500-511.
- Green, D. M. & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley.
- Grote, A. (1983). *Anzahl, Zahl und Menge. Die phänomenologischen Grundlagen der Arithmetik*. Hamburg: Meiner.
- Gundlach, H. (1976). Reiz - Zur Verwendung eines Begriffes in der Psychologie. Bern:Huber.
- Haith, M. M., Hazan, C., & Goodman, G. S. (1988). Expectation and anticipation of dynamic visual events by 3.5-month-old babies. *Child Development*, 59, 467-479.
- Haith, M. M. (1993). Preparing for the 21st century: Some goals and challenges for studies of infant sensory and perceptual development. *Developmental Review*, 13, 354-371.
- Haith, M. M. (1998). Who put the cog in infant cognition? Is rich interpretation too costly? *Infant Behavior and Development*, 21, 167-179.
- Haith, M. M., & Benson, J. B. (1998). Infant cognition. In W. Damon, D. Kuhn, & R. S. Siegler (Hrsg.), *Handbook of Child Psychology. Vol.2: Cognition, Perception and Language* (5th ed., S. 199-254). New York: Wiley.
- Haubensak, G. (1985). *Absolutes und vergleichendes Urteil*. Springer: Berlin.
- Hellbrück, J. (1993). *Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Heller, O. (1980). Orientierung innerhalb von phänomenalen Steigerungsreihen. In W. Lauterbach & V. Sarris (Hrsg.), *Beiträge zur psychologischen Bezugssystemforschung* (107-136). Bern: Huber.
- Herrmann, T. (1988). Mentale Repräsentation - ein erläuterungsbedürftiger Begriff. *Sprache & Kognition*, 7, 162-175.

- Hillenbrand, J. M. (1984). Speech perception by infants: Categorization based on nasal consonant place of articulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 75, 1613-1622.
- Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen : Hogrefe.
- Hunter, M. A. & Ames, E. W. (1988). A multifactor model of infant preferences for novel and familiar stimuli. In C. Rovee-Collier & L. P. Lipsitt (Hrsg.), *Advances in infancy research* (Bd. 5, S. 69-95). Norwood, N.J.: ALEX.
- Ifrah, G. (1991). *Universalgeschichte der Zahlen (2. Aufl.)*. Frankfurt a. M.: Campus.
- Intraub, H. (1997). The representation of visual scenes. *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 217-222.
- Johnson, M. H., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1991). Components of visual orienting in early infancy: Contingency learning, anticipatory looking, and disengaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 335-344.
- Julesz, B. (1984). Towards an axiomatic theory of preattentive vision. In G. Edelman, W. Gall, & W. Cowan (Hrsg.), *Dynamic aspects of neocortical function* (S. 585-612). New York: Wiley.
- Jusczyk, P. W. (1985). The high-amplitude sucking technique as a methodological tool in speech perception research. In G. Gottlieb & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Measurement of Audition and Vision in the first year of postnatal life: A methodological overview* (S. 194-222). Norwood, NJ: Ablex.
- Kahneman, D. & Treisman, A. (1984). Changing views of attention and automaticity. In R. Parasuraman & D. A. Davies (Hrsg.), *Varieties of attention* (S. 29-61). New York: Academic Press.
- Kahneman, D. & Treisman, A., & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, 24, 175-219.
- Kanwisher, N. G. & Driver, J. (1992). Objects, attributes, and visual attention: which, what, and where. *Current Directions in Psychological Science*, 1, 26-31.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity. A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kaufman, E., Lord, M., Reese, T., & Volkman, J. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62, 498-525.
- Kellman, P. J. & Spelke, E. (1983). Perception of partly occluded objects in infancy. *Cognitive Psychology*, 15, 483-524.
- Kemler Nelson, D. G., Jusczyk, P. W., Mandel, D. R., Myers, J., Turk, A., & Gerken, L. A. (1995). The head-turn preference procedure for testing auditory perception. *Infant Behavior and Development*, 18, 111-116.
- Klahr, D. (1973). A production system for counting, subitizing and adding. In W. G. Chase (Hrsg.), *Visual information processing* (S. 527-546). New York: Academic Press.
- Klahr, D. (1973). Quantification processes. In W. G. Chase (Hrsg.), *Visual information processing* (S. 3-34). New York: Academic Press.
- Klahr, D. & Wallace, J. (1976). *Cognitive development: An information-processing view*. Hillsdale, NJ: LEA.
- Kliegl, R., Mayr, U., & Krampe, R. T. (1994). Time-accuracy functions for determining process and person differences: An application to cognitive aging. *Cognitive Psychology*, 26, 134-164.
- Köhler, W. (1924). Gestaltprobleme und Anfänge einer Gestalttheorie. *Jahresbericht über die gesamte Physiologie und experimentelle Pharmakologie*, 2, 512-539 (repr. in *Gestalt Theory*, 5, 178-205, 1983).

- Koffka, K. (1925). *Die Grundlagen der psychischen Entwicklung* (2., verbesserte Aufl.). Osterwieck am Harz: Zickfeldt.
- Kotovskiy, L. & Gentner, D. (1996). Comparison and categorization in the development of relational similarity. *Child Development*, 67, 2797-2822.
- Krämer, S. (1988). *Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung in geschichtlichem Abriß*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Kreitler, H. & Kreitler, S. (1970). The cognitive antecedents of the orienting reflex. *Schweizerische Zeitschrift für Psychologie*, 29, 94-105.
- Kreitler, H. & Kreitler, S. (1972). The model of cognitive orientation: Towards a theory of human behavior. *British Journal of Psychology*, 63, 9-30.
- Krist, H., Natour, N., Jäger, S., & Knopf, M. (1998). Kognitive Entwicklung im Säuglingsalter: Vom Neo-Nativismus zu einer entwicklungsorientierten Konzeption. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 30, 153-173.
- Krist, H., Natour, N., & Knopf, M. (1998). Vom Neo-Nativismus zu einer entwicklungsorientierten Konzeption kognitiver Entwicklung im Säuglingsalter: Anreicherung oder begrifflicher Wandel? Replik zum Kommentar von Beate Sodian. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 30, 179-182.
- Kuhl, P. K. (1983). Perception of auditory equivalence classes for speech in early infancy. *Infant Behavior and Development*, 6, 263-285.
- Kuhl, P. K. (1985). Methods in the study of infant speech perception. In G. Gottlieb & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Measurement of Audition and Vision in the first year of postnatal life: A methodological overview* (S. 223-251). Norwood, NJ: Ablex.
- Kuhl, P. K. (1987). Perception of speech and sound in early infancy. In P. Salapatek & L. Cohen (Hrsg.), *Handbook of infant perception. Vol.2: From perception to cognition* (S. 275-382). Orlando: Academic Press.
- Kuhl, P. K. (1992). Psychoacoustics and speech perception: Internal standards, perceptual anchors, and prototypes. In L. A. Werner & E. W. Rubel (Hrsg.), *Developmental Psychoacoustics* (S. 293-332). Washington, DC: APA.
- Laberge, D. (1983). Spatial extent of attention to letters and words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 371-379.
- Laming, D. (1986). *Sensory analysis*. London: Academic Press.
- Laux, J. (1969). *Die Bildung des Zahlbegriffs in den ersten drei Schuljahren*. Stuttgart: Klett.
- Lechelt, E. C. (1975). Temporal numerosity discrimination: Intermodal comparisons revisited. *British Journal of Psychology*, 66, 101-108.
- Lécuyer, R. (1989). Habituation and attention, novelty and cognition: where is the continuity? *Human Development*, 32, 148-157.
- Leslie, L. B. (1991). Infant attention: An information processing approach. In M. J. S. Weiss & P. R. Zelazo (Hrsg.), *Newborn attention. Biological constraints and the influence of experience* (S. 1-21). Norwood, N.J.: Ablex.
- Leslie, A. M., Xu, F., Tremoulet, P. D., & Scholl, B. J. (1998). Indexing and the object concept: developing 'what' and 'where' systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 10-18.
- Lewis, D. & Burke, C. J. (1949). The use and misuse of the chi-square test. *Psychological Bulletin*, 46, 433-489.

- Liddle, I. & Wilkinson, J. E. (1987). The emergence of order and class aspects of number in children: Some findings from a longitudinal study. *British Journal of Educational Psychology*, 57, 237-243.
- Liss, P. & Reeves, A. (1983). Interruption of dot processing by a backward mask. *Perception*, 12, 513-529.
- Little, A. H., Lipsitt, L. P., & Rovee-Collier, C. (1984). Classical conditioning and retention of the infant's eyelid response: Effects of age and interstimulus interval. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 512-524.
- Loftus, G. R., Duncan, J. & Gehrig, P. (1992). On the time course of perceptual information that results from a brief visual presentation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 530-549.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527.
- Logie, R. H. & Baddeley, A. D. (1987). Cognitive processes in counting. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 310-326.
- Loosbroek, E. van & Smitsman, A. W. (1990). Visual perception of numerosity in infancy. *Developmental Psychology*, 26, 916-922.
- Lorenzen, P. (1974). Gleichheit und Abstraktion (Orig. 1962). In P. Lorenzen (Hrsg.) *Konstruktive Wissenschaftstheorie* (190-203). Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Lorinstein, B. & Haber, R. (1975). Perceived numerosity: An information processing analysis. *Canadian Journal of Psychology*, 29, 224-236.
- Macar, F., Grondin, S., & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory & Cognition*, 22, 673-686.
- Mack, W. (1999). Zeichenprozesse in der Psychologie des Raumes. *Kodikas / Code*, 22, 209-233.
- Mack, W. (1998). Otto Selz und die Kognitionswissenschaft. *Brentano Studien*, 7, 315-333.
- Mack, W. & Emrich, M. (i. Vorb.). (o. Jahr). *Recognition of numerical equivalence in preschoolers: The role of familiarity of objects*.
- Mack, W. & Meyer, M. (in Vorb.). (o. Jahr). *Recognition of numerical equivalence in preschool children: Producing numerosities*.
- Macmillan, N. A. & Kaplan, H. L. (1985). Detection theory analysis of group data: Estimating sensitivity from average hit and false-alarm rates. *Psychological Bulletin*, 98, 185-199.
- Maier, H. (1990). *Didaktik des Zahlbegriffs*. Hannover: Schroedel Schulbuchverlag.
- Malcuit, G., Pomerleau, A., & Lamarre, G. (1988). La recherche sur l'apprentissage operant chez le nourrisson: Un parallele avec l'etat general de la question chez l'humain. *Annee Psychologique*, 88, 257-282.
- Mandler, G. & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 1-22.
- Mandler, J. M. & McDonough, L. (1998a). On developing a knowledge base in infancy. *Developmental Psychology*, 34, 1274-1288.
- Mandler, J. M., & McDonough, L. M. (1998b). Studies in inductive inference in infancy. *Cognitive Psychology*, 37, 60-96.
- Marean, G. C., Werner, L. A., & Kuhl, P. K. (1992). Vowel categorization by very young infants. *Developmental Psychology*, 28, 396-405.

- Markovits, H., Dumas, C., & Malfait, N. (1995). Understanding transitivity of a spatial relationship: A developmental analysis. *Journal of Experimental Child Psychology*, *59*, 124-141.
- Marr, D. (1976). Early processing of visual information. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, *275*, 483-524.
- Marr, D. (1982). *Vision. A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. San Francisco: Freeman.
- Massaro, D. W. (1976). Perceiving and counting sounds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *2*, 337-346.
- Matin, E. (1974). Saccadic suppression: A review and an analysis. *Psychological Bulletin*, *81*, 899-917.
- McCall, R. B. (1979). Individual differences in the pattern of habituation at 5 and 10 months of age. *Developmental Psychology*, *15*, 559-569.
- McCall, R. B. & Carriger, M. S. (1993). A meta-analysis of infant habituation and recognition memory performance as predictors of later IQ. *Child Development*, *64*, 57-79.
- McEvoy, J. & O'Moore, A. M. (1991). Number conservation: A fair assessment of numerical understanding? *Irish Journal of Psychology*, *12*, 325-337.
- McFadden, D. (1970). Three computational versions of proportion correct for use in forced-choice experiments. *Perception and Psychophysics*, *8*, 336-342.
- McGarrigle, J. & Donaldson, M. (1974). Conservation accidents. *Cognition*, *3*, 341-350.
- Mehler, J. & Bever, T. G. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science*, *158*, 141-142.
- Medin, D. L., Goldstone, R. L., & Gentner, D. (1993). Respects for similarity. *Psychological Review*, *100*, 254-278.
- Mechner, F. (1958). Probability relations within response sequences under ration reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *1*, 109-122.
- Meck, W. H. (1983). Selective adjustment of the speed of internal clock and memory processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal behavior processes*, *9*, 171-201.
- Meck, W. H., & Church, R. M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal behavior processes*, *9*, 320-334.
- Meltzoff, A. N. (1988). Infant imitation and memory: Nine-month-olds in immediate and deferred tests. *Child Development*, *59*, 217-225.
- Meltzoff, A. N. & Moore, M. K. (1998). Object representation, identity, and the paradox of early permanence: Steps toward a new framework. *Infant Behavior and Development*, *21*, 201-235.
- Menninger, K. (1979). *Zahlwort und Ziffer. Eine Kulturgeschichte der Zahl (3.Aufl., unveränd. Nachd. d. 2., neubearb. u. erw. Aufl. von 1958)*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Metzger, W. (1953). *Gesetze des Sehens (2. Aufl.)*. Frankfurt a. M.: Kramer.
- Metzger, W. (1975). *Psychologie (5. Aufl.)*. Darmstadt: Steinkopff.
- Miller, D. J. (1993). Do animals subitize? In S. T. Boysen, & E. J. Capaldi (Hrsg.), *The development of numerical competence. Animal and human models* (S. 149-169). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 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.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414-417.

- Mix, K. S., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1996). Do preschool children recognize auditory-visual numerical correspondences? *Child Development, 67*, 1592-1608.
- Mix, K. S., Levine, S. C., & Huttenlocher, J. (1997). Numerical abstraction in infants: Another look. *Developmental Psychology, 33*, 423-428.
- Mix, K. S. (1999a). Similarity and numerical equivalence: Appearances count. *Cognitive Development, 14*, 269-297.
- Mix, K. S. (1999b). Preschoolers' recognition of numerical equivalence: Sequential sets. *Journal of Experimental Child Psychology, 74*, 309-332.
- Moore, D., Benenson, J., Reznick, J. S., Peterson, M., & Kagan, J. (1987). Effect of auditory numerical information on infants' looking behavior: Contradictory evidence. *Developmental Psychology, 23*, 665-670.
- Moore, M. K., Borton, R., & Darby, B. L. (1978). Visual tracking in young infants: Evidence for object identity or object permanence? *Journal of Experimental Child Psychology, 25*, 183-198.
- Morrongiello, B. A. (1986). Infants' perception of multiple-group auditory patterns. *Infant Behavior and Development, 9*, 307-319.
- Morrongiello, B. A. (1988). The development of auditory pattern perception skills. In C. Rovee-Collier, & L. P. Lipsitt (Hrsg.), *Advances in Infancy Research* (Bd. 5, S. 135-172). Norwood, NJ: Ablex.
- Neumann, O. (1992). Theorien der Aufmerksamkeit: Von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau, 43*, 83-101.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Nothdurft, H. C. (1985). Orientation sensitivity and texture segmentation in patterns with different line orientation. *Vision Research, 25*, 551-560.
- Oeffelen, M. P. van & Vos, P. G. (1982). A probabilistic model for the discrimination of visual number. *Perception and Psychophysics, 32*, 163-170.
- Oyama, T., Kikuchi, T., & Ichihara, S. (1981). Span of attention, backward masking and reaction time. *Perception and Psychophysics, 29*, 106-112.
- Olson, G. M. & Sherman, T. (1983). Attention, learning, and memory in infants. In M. M. Haith & J. J. Campos (Hrsg.), *Infancy and developmental psychobiology* (Bd. 2, S. 1001-1080). New York: Wiley.
- O'Regan, J. K. (1992). Solving the "real" mysteries of visual perception: The world as an outside memory. *Canadian Journal of Psychology, 46*, 461-488.
- Papousek, H. (1961). Conditioned head rotation reflexes in infants in the first months of life. *Acta Paediatrica, 50*, 565-576.
- Papousek, H. (1977). The development of learning ability in infancy. In G. Nissen (Hrsg.), *Intelligence, learning and learning disturbances*. New York: Springer.
- Parkman, J. & Groen, G. (1972). Temporal aspects of simple addition and comparison. *Journal of Experimental Psychology, 89*, 335-342.
- Pawlowski, T. (1980). *Begriffsbildung und Definition*. Berlin, New York: de Gruyter.
- Piaget, J. & Szeminska, A. (1941). *Die Entwicklung des Zahlbegriffs beim Kinde (Neuaufgabe 1975)*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Piaget, J. (1948). *Psychologie der Intelligenz*. Zürich: Rascher.
- Piaget, J. (1964). *Six études de psychologie*. Paris: Gonthier.

- Piaget, J. (1972). *Die Entwicklung des Erkennens I. Das mathematische Denken*. Stuttgart: Klett.
- Piaget, J. (1975a). *Das Erwachen der Intelligenz beim Kinde (Orig. 1959)*. Stuttgart: Klett.
- Piaget, J. (1975b). *Der Aufbau der Wirklichkeit beim Kinde (Orig. 1937)*. Stuttgart: Klett.
- Piaget, J. (1975c). *Nachahmung, Spiel und Traum (Orig. 1959)*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Piaget, J. (1983). *Biologie und Erkenntnis (Orig. 1967)*. Frankfurt / Main: Fischer.
- Piaget, J. (1985). *Weisheit und Illusionen der Philosophie (Orig. 1965)*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Platt, J. R. & Johnson, D. M. (1971). Localization of position within a homogeneous behavior chain: Effects of error contingencies. *Learning and Motivation*, 2, 386-414.
- Posner, M., Snyder, C., & Davidson, B. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109, 160-174.
- Poulton, E. C. (1989). *Bias in quantifying judgment*. Hove and London, U.K.: LEA.
- Powers, W. T. (1977). Rückkopplungsprinzipien in der Organisation von Verhalten. In H. Zeier (Hrsg.), *Pawlow und die Folgen. Die Psychologie des 20. Jahrhunderts* (Bd. IV, S. 573-613). Zürich: Kindler.
- Prechtl, H. F. R. (1974). The behavioural states of the newborn infant (a review). *Brain Research*, 76, 1304-1311.
- Prechtl, H. F. R. (1986). Prenatal motor development. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Hrsg.), *Motor Development in Children: aspects of coordination and control*. Dordrecht: Nijhoff.
- Prinz, W. (1983). *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Berlin: Springer.
- Prinz, W. (1990). Wahrnehmung. In H. Spada (Hrsg.), *Lehrbuch allgemeine Psychologie* (S. 25-114). Bern: Huber.
- Pylyshyn, Z. (1989). The role of location indexes in spatial perception: A sketch of the FINST spatial-index model. *Cognition*, 32, 65-97.
- Pylyshyn, Z. (1994). Some primitive mechanisms of spatial attention. *Cognition*, 50, 363-384.
- Pylyshyn, Z. W. & Storm, R. W. (1988). Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision*, 3, 179-197.
- Rahmstorf, G. (1992). Semiotische Aspekte der visuellen Wahrnehmung. *Fortschritte in der Wissensorganisation*, 2, 42-62.
- Rausch, E. (1937). Über Summativität und Nichtsummativität. *Psychologische Forschung*, 21, 209-289.
- Restle, F. & Greeno, J. (1970). *Introduction to mathematical psychology*. Reading, MA: Addison Wesley.
- Rheingold, H. L. (1985). Development as the acquisition of familiarity. *Annual Review of Psychology*, 36, 1-17.
- Richards, J. E. & Casey, B. J. (1992). Development of sustained visual attention in the human infant. In B. A. Campbell, H. Hayne, & R. Richardson (Hrsg.), *Attention and Information processing in infants and adults. Perspectives from human and animal research* (S. 30-60). Hillsdale, NJ: LEA.
- Rieth, C., & Sireteanu, R. (1994). Texture segmentation and visual search based on orientation contrast: An infant study with the familiarization-novelty preference method. *Infant Behavior and Development*, 17, 359-369.
- Rosenthal, R. (1979). The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological Bulletin*, 86, 638-641.

- Rosenthal, R. (1991). Meta-analysis: A review. *Psychosomatic Medicine*, 53, 247-271.
- Rovee, C. K., & Rovee, D. T. (1969). Conjugate reinforcement of infant exploratory behavior. *Journal of experimental child psychology*, 8, 33-39.
- Rovee-Collier, C. (1987). Learning and memory in infancy. In J. D. Osofsky (Hrsg.), *Handbook of infant development* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Rovee-Collier, C. (1990). The "memory system" of prelinguistic infants. In A. Diamond (Hrsg.), *Development and neural bases of higher cognitive functions* (S. 517-542). New York: New York Academy of Sciences Press.
- Rovee-Collier, C., Hankins, E., & Bhatt, R. (1992). Textons, visual pop-out effects, and object recognition in infancy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121, 435-445.
- Ruff, H. A. & Rothbart, M. K. (1996). *Attention in early development. Themes and variations*. New York: Oxford University Press.
- Russel, B. (1924). Introduction to mathematical philosophy. London: Allen & Unwin.
- Rutkowska, J. C. (1993). *The computational infant. Looking for developmental cognitive science*. New York etc.: Harvester/Wheatsheaf.
- Sagi, D. & Julesz, B. (1985a). Detection versus discrimination of visual orientation. *Perception*, 14, 619-628.
- Sagi, D. & Julesz, B. (1985b). "Where" and "what" in vision. *Science*, 228, 1217-1219.
- Sagi, D. & Julesz, B. (1987). Short-range limitation on detection of feature differences. *Spatial Vision*, 2, 39-49.
- Salapatek, P. & Cohen, L. (1987a). *Handbook of infant perception. Vol 1: From sensation to perception*. New York: Academic Press.
- Salapatek, P. & Cohen, L. (1987b). *Handbook of infant perception. Vol. 2: From perception to cognition*. New York: Academic Press.
- Sameroff, A. J. (1967). Nonnutritive sucking in newborns under visual and auditory stimulation. *Child Development*, 38, 443-452.
- Sameroff, A. J. (1971). Can conditioned responses be established in the newborn infant: 1971? *Developmental Psychology*, 5, 1-12.
- Sandhofer, C. M. & Smith, L. B. (1999). Learning color words involves learning a system of mappings. *Developmental Psychology*, 35, 668-679.
- Saxe, G. B. (1981). Body parts as numerals: A developmental analysis of numeration among the Oksapmin in Papua New Guinea. *Child Development*, 52, 306-316.
- Schäfer, L. (1973). Quantität. In H. Krings, H. M. Baumgartner & C. Wild (Hrsg.), *Handbuch philosophischer Grundbegriffe* (Bd. 4, S. 1146-1154). München: Kösel.
- Schäfer, L. (1973). Zahl. In H. Krings, H.-M. Baumgartner & C. Wild (Hrsg.), *Handbuch philosophischer Grundbegriffe* (Bd. 6, S. 1775-1787). München: Kösel.
- Schaeffer, B., Eggleston, V. H., & Scott, J. L. (1974). Number development in young children. *Cognitive Psychology*, 6, 357-379.
- Schmidt, J. (1966). *Mengenlehre I*. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- Schneider, B. A. & Trehub, S. E. (1985). Infant auditory psychophysics: An overview. In G. Gottlieb & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Measurement of Audition and Vision in the first year of postnatal life: A methodological overview* (S. 113-126). Norwood, NJ: Ablex.
- Schneider, B. A., Trehub, S. E., & Thorpe, L. (1991). Developmental perspectives on the localization and detection of auditory signals. *Perception and Psychophysics*, 49, 10-20.

- Scholl, B. J. & Pylyshyn, Z. W. (1999). Tracking multiple items through occlusion: Clues to visual objecthood. *Cognitive Psychology*, 38, 259-290.
- Schüle, W. (1984). Psychologische Grundfragen der gestalttheoretischen Lehre von den Bezugssystemen. *Gestalt Theory*, 6, 271-287.
- Selz, O. (1913). *Über die Gesetze des geordneten Denkverlaufs. Eine experimentelle Untersuchung*. Stuttgart: Speemann.
- Selz, O. (1924). *Die Gesetze der produktiven und reproduktiven Geistestätigkeit: Kurzgefasste Darstellung*. Bonn: Cohen.
- Shepard, R. N. (1987). Toward a universal law of generalization for psychological science. *Science*, 237, 1317-1323.
- Shepard, R. N. (1984). Ecological constraints on internal representation: Resonant kinematics of perceiving, imagining, thinking, and dreaming. *Psychological Review*, 91, 417-447.
- Shipley, E. F., & Shepperson, B. (1990). Countable entities: Developmental changes. *Cognition*, 34, 109-136.
- Shipley, E. F., & Shepperson, B. (1990). The what-if of counting. *Cognition*, 36, 285-289.
- Siegel, L. S. (1973). The role of spatial arrangement and heterogeneity in the development of concepts of numerical equivalence. *Canadian Journal of Psychology*, 27, 351-355.
- Siegel, L. S. & Goldstein, A. G. (1969). Conservation of number in young children. Recency versus relational response strategies. *Developmental Psychology*, 2, 128-130.
- Siegler, R. S. (1981). Developmental sequences within and between concepts. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 46.
- Simon, T. J. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge: A "non-numerical" account. *Cognitive Development*, 12, 349-372.
- Simon, T. J., Hespos, S. J., & Rochat, P. (1995). Do infants understand simple arithmetic? A replication of Wynn (1992). *Cognitive Development*, 10, 253-269.
- Simons, D. & Langheinrich, D. (1982). What is magic about about the magical number four? *Psychological Research*, 44, 283-294.
- Singer, W. (1996). Neuronal synchronization: A solution to the binding problem? In R. Llinás & P. S. Churchland (Hrsg.), *The mind-brain continuum* (S. 101-130). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Singer, W. (2000). Das Bild im Kopf - ein Paradigmenwechsel. Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. *Universitas*, 55, 109-121.
- Sireteanu, R. (2000). Texture segmentation, "pop-out", and feature binding in infants and children. In C. Rovee-Collier, L. P. Lipsitt, & H. Hayne (Hrsg.), *Progress in Infancy Research* (Bd. 1, S. 183-249). Mahwah, NJ : LEA.
- Slater, A. (1995). Visual perception and memory at birth. In C. Rovee-Collier & L. P. Lipsitt (Hrsg.), *Advances in Infancy Research* (Bd. 9, S. 107-162). Norwood, NJ: Ablex.
- Slater, A., Morison, V., & Rose, D. (1983). Locus of habituation in the human newborn. *Perception*, 12, 593-598.
- Slater, A. M., Morison, V., & Somers, M. (1988). Orientation discrimination and cortical function in the human newborn. *Perception*, 17, 597-602.
- Slater, A. M., Mattock, A., & Brown, E. (1990). Newborn infants' responses to retinal and real size. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 314-322.
- Sliwinski, M. (1997). Aging and counting speed: Evidence for process-specific slowing. *Psychology and Aging*, 12, 38-49.

- Smith, L. B. (1993). The concept of same. In W. H. Reese (Hrsg.), *Advances in Child Development and Behavior* (Bd. 24, S. 215-252). New York: Academic Press.
- Sokolov, Y. N. (1963). *Perception and the conditioned reflex*. New York: Macmillan.
- Soja, N., Carey, S., & Spelke, E. S. (1991). Ontological categories guide young children's inductions of word meaning: Object terms and substance terms. *Cognition*, 38, 179-211.
- Sophian, C. (1987). Early developments in children's use of counting to solve quantitative problems. *Cognition and Instruction*, 4, 61-90.
- Sophain, C. (1996). Young children's numerical cognition: What develops? *Annals of Child Development*, 12, 49-86.
- Spelke, E. S. (1985). Preferential-looking methods as tools for the study of cognition in infancy. In G. Gottlieb & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Measurement of Audition and Vision in the first year of postnatal life: A methodological overview* (S. 323-363). Norwood, NJ: Ablex.
- Spelke, E. S. & Kestenbaum, R. (1986). Les origines du concept d'object. *Psychologie Francaise*, 31, 67-72.
- Spelke, E. S., Breinlinger, K., Macomber, J., & Jacobson, K. (1992). Origins of knowledge. *Psychological Review*, 99, 605-632.
- Spelke, E. S. & Newport, E. L. (1998). Nativism, empiricism, and the development of knowledge. In W. Damon (Hrsg.), *Handbook of Child Psychology* (5th. ed.). Vol. 1: Theoretical Models of Human Development (S. 275-340). New York: Wiley.
- Staddon, J. E. R. (1988). Learning as inference. In R. C. Bolles & M. D. Beecher (Hrsg.), *Evolution and Learning* (S. 59-77). Hillsdale, NJ: LEA.
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by infants. *Science*, 210, 1033-1035.
- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondencies. *Science*, 222, 179-181.
- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36, 97-127.
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 399-420.
- Steffe, L., von Glasersfeld, E., Richards, J., & Cobb, P. (1983). *Children's counting types: Philosophy, theory, and application*. New York: Praeger.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.
- Strawson, P. F. (1959). *Individuals*. London: Methuen.
- Strauss, M. S. & Curtis, L. E. (1981). Infant perception of numerosity. *Child Development*, 52, 1146-1152.
- Strohner, H. (1990). *Textverstehen*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Stone, L. J., Smith, H. T., & Murphy, L. B. (eds). (1974). *The competent infant*. London: Tavistock.
- Tack, W. H. (1983). Psychophysische Methoden. In H. Feger & J. Bredenkamp (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Serie B, I, Bd. 3* (S. 346-426). Göttingen: Hogrefe.
- Taubman, R. E. (1950). Studies in judged number. I. The judgment of auditory number. *Journal of General Psychology*, 43, 167-194.
- Teller, D. Y., McDonald, M. A., Preston, K., Sebris, S. L., & Dobson, V. (1986). Assessment of visual acuity in infants and children: The acuity card procedure. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 28, 779-789.

- Thelen, E., Skala, K. D., & Kelso, J. A. S. (1987). The dynamic nature of early coordination: evidence from bilateral leg movements in young infants. *Developmental Psychology, 23*, 179-186.
- Thelen, E. & Smith, L. B. (eds.). (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Thorpe, L. A., Trehub, S. E., Morrongiello, B. A., & Bull, D. (1988). Perceptual grouping by infants and preschool children. *Developmental Psychology, 24*, 484-491.
- Thomas, R. K. & Lorden, R. B. (1993). Numerical competence in animals: A conservative view. In S. T. Boysen & E. J. Capaldi (Hrsg.), *The development of numerical competence. Animal and human models* (S. 127-147). Hillsdale, NJ: LEA.
- Thompson, R. E., Mayers, K. S., Robertson, R. T., & Patterson, C. J. (1970). Number coding in association cortex of the cat. *Science, 168*, 271-273.
- Townsend, J. T. & Ashby, F. G. (1983). *The stochastic modeling of elementary psychological processes*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Trehub, S. E., Schneider, B. A., & Bull, D. (1981). Effect of reinforcement on infant's performance in an auditory detection task. *Developmental Psychology, 17*, 872-877.
- Trehub, S. E., Thorpe, L. A., & Morrongiello, B. A. (1987). Organizational processes in infants' perception of auditory patterns. *Child Development, 58*, 741-749.
- Trehub, S. E. & Thorpe, L. A. (1989). Infants' perception of rhythm: Categorization of auditory sequences by temporal structure. *Canadian Journal of Psychology, 43*, 217-229.
- Treiber, F. & Wilcox, S. (1984). Discrimination of number by infants. *Infant Behavior and Development, 7*, 93-100.
- Treisman, A. (1986). Properties, parts and objects. In K. Boff, L. Kaufman, & J. Thomas (Hrsg.), *Handbook of perception and human performance* (S. 35-1 - 35-70). New York: Wiley.
- Treisman, A. (1988). Features and objects: The 14th Bartlett memorial lectures. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 40*, 201-237.
- Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung, 31*, 299-337.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1993). What enumeration studies can show us about spatial attention: Evidence for limited capacity preattentive processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 19*, 331-351.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1994a). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review, 101*, 80-102.
- Trick, L. M. & Pylyshyn, Z. W. (1994b). Cueing and counting: Does the position of the attentional focus affect enumeration? *Visual Cognition, 1*, 67-100.
- Trick, L. M., Enns, J. T., & Brodeur, D. A. (1996). Life span changes in visual enumeration: The number discrimination task. *Developmental Psychology, 32*, 925-932.
- Uller, C., Carey, S., Huntley-Fenner, G., & Klatt, L. (1999). What representations might underlie infant numerical knowledge? *Cognitive Development, 14*, 1-36.
- Ullman, S. (1984). Visual routines. *Cognition, 18*, 97-159.
- Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. W. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of visual behavior* (S. 549-586). Boston: MIT Press.
- Valentine, C. W. (1914). The colour perception and colour preferences of an infant during its fourth and eighth months. *British Journal of Psychology, 6*, 363-386.

- Voigt, F. (1983). *Entwicklungslinien des Zahlbegriffs im Vorschulalter: eine Längsschnittstudie (unveröffentlichte Dissertation)*. Heidelberg: Universität Heidelberg.
- Wachs, T. D. & Smitherman, C. H. (1985). Infant temperament and subject loss in a habituation procedure. *Child Development*, 56, 861-867.
- Wartenberg, F. (1994). Piagets Theorie des Zahlbegriffes. In Graduiertenkolleg Kognitionswissenschaft Hamburg (Hrsg.), *Bericht Nr. 44*. Hamburg.
- Waxman, S. R. & Markow, D. B. (1995). Words as invitations to form categories: Evidence from 12- to 13-month-old infants. *Cognitive Psychology*, 29, 257-302.
- Werner, H. (1953). *Einführung in die Entwicklungspsychologie (Dritte, umgearbeitete Auflage)*. München: J.A. Barth.
- Werner, L. A., & Bargones, J. Y. (1992). Psychoacoustic development of human infants. In C. Rovee-Collier & L Lipsitt (Hrsg.), *Advances in infancy research* (Bd. 7, S. 103-145). Norwood, NJ: Ablex.
- Wertheimer, M. (1912). Über das Denken der Naturvölker. I. Zahlen und Zahlgebilde. *Zeitschrift für Psychologie*, 60, 321-378.
- Westermann, R. (1987). Wahrnehmung: Psychophysische Skalierung und Informationsintegration. In G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine experimentelle Psychologie* (S. 265-308). Stuttgart: G. Fischer.
- White, C. T. (1963). Temporal numerosity and the psychological unit of duration. *Psychological Monographs*, 77, 1-37.
- Witte, W. (1966). Das Problem der Bezugssysteme. In W. Metzger & H. Erke (Hrsg.), *Wahrnehmung und Bewußtsein. Handbuch der Psychologie, Bd. 1/1* (S. 1003-1027). Göttingen: Hogrefe.
- Wolfe, J., Cave, K., & Franzel, S. (1989). Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 419-433.
- Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36, 155-193.
- Wynn, K. (1992a). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.
- Wynn, K. (1992b). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive Psychology*, 24, 220-251.
- Wynn, K. (1995). Infants possess a system of numerical knowledge. *Current Directions in Psychological Science*, 4, 172-177.
- Xu, F. & Carey, S. (1996). Infants' metaphysics: The case of numerical identity. *Cognitive Psychology*, 30, 111-153.
- Xu, F. & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, B1-B11.
- Zoeke, B. & Sarris, V. (1983). A comparison of "frame of reference" paradigms in human and animal psychophysics. In H.-G. Geissler, E. L. J. Leeuwenberg, & V. Sarris (Hrsg.), *Modern issues in perception* (S. 283-317). Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Anhang

Abbildungen

Abbildungen 1a - 1g:

Diskrimination von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)

Beobachter WM

(Experiment 1, Kapitel 3, S. 73)

Abb. 1a

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=0$)

Beobachter WM

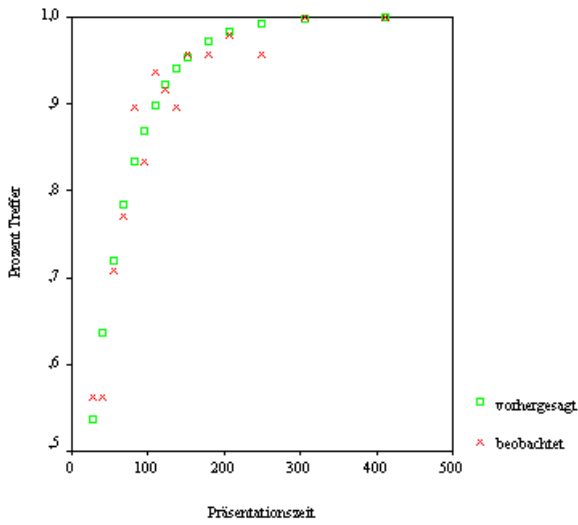


Abb. 1b

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=1$)

Beobachter WM

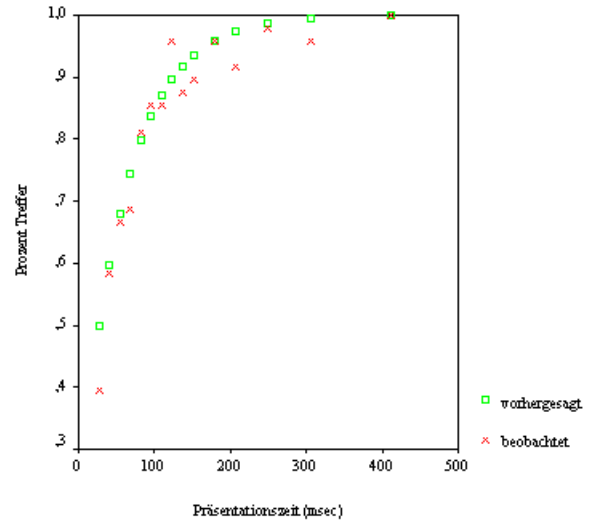


Abb. 1c

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=2$)

Beobachter WM

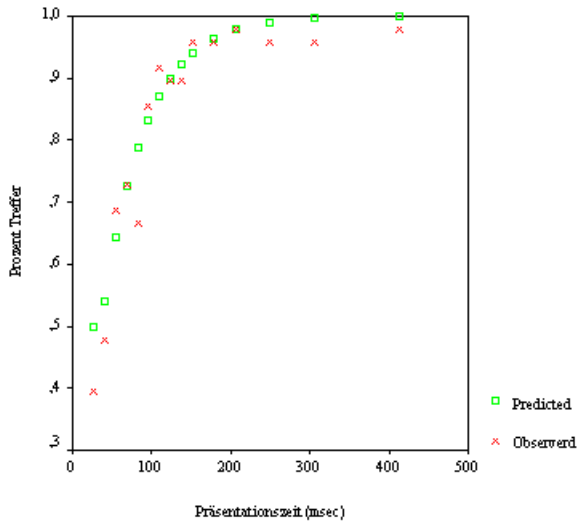


Abb. 1d

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=3$)

Beobachter WM

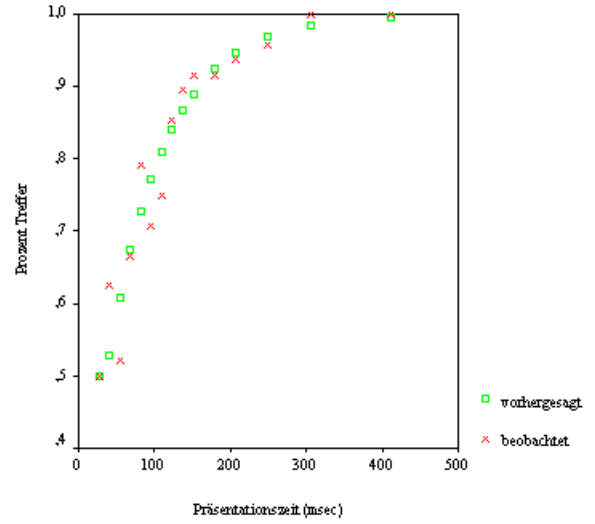


Abb. 1e

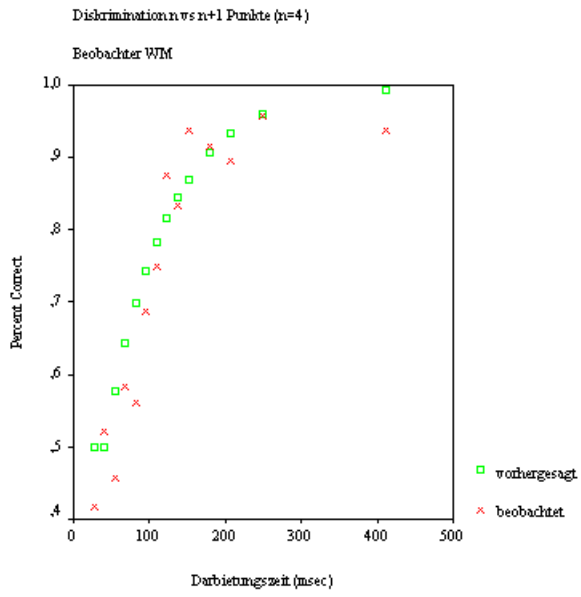


Abb. 1f

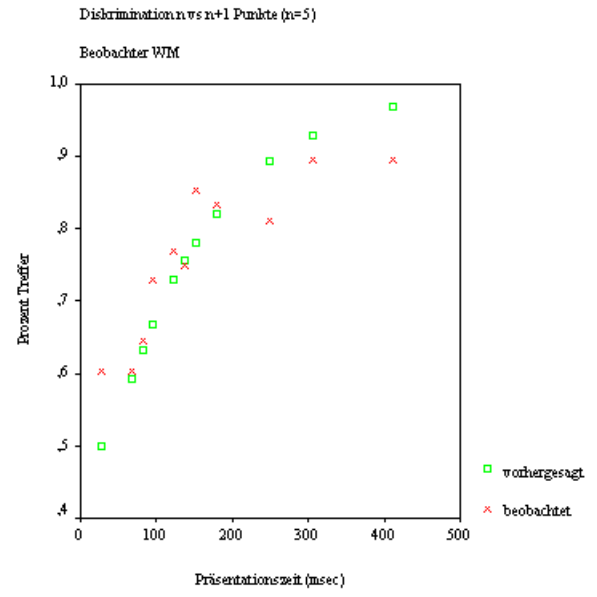
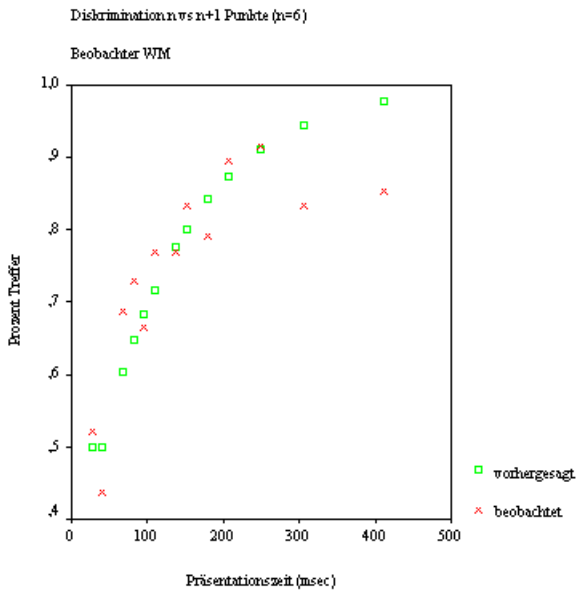


Abb. 1g



Abbildungen 2a - 2g:

Diskrimination von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)

Beobachter TL

(Experiment 1, Kapitel 3, S. 73)

Abb. 2a

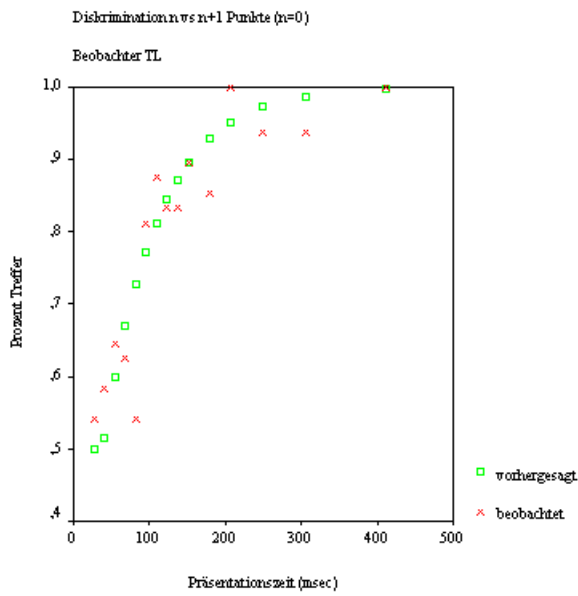


Abb. 2b

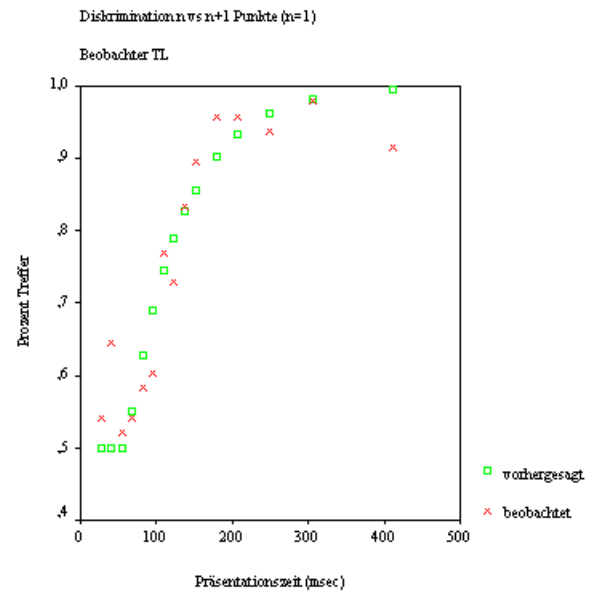


Abb. 2c

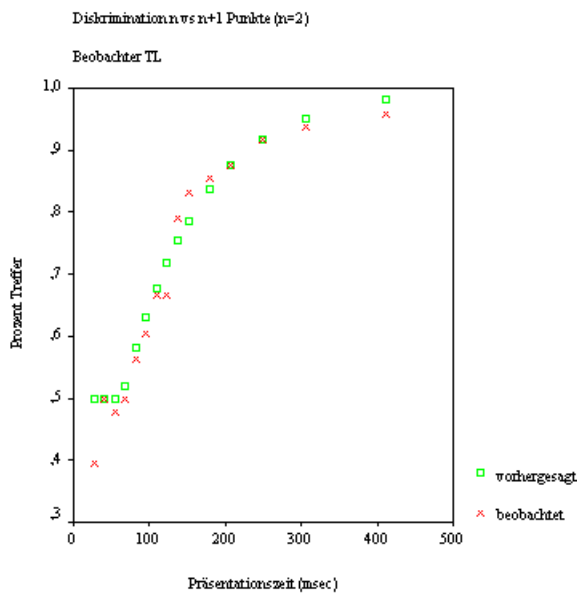


Abb. 2d

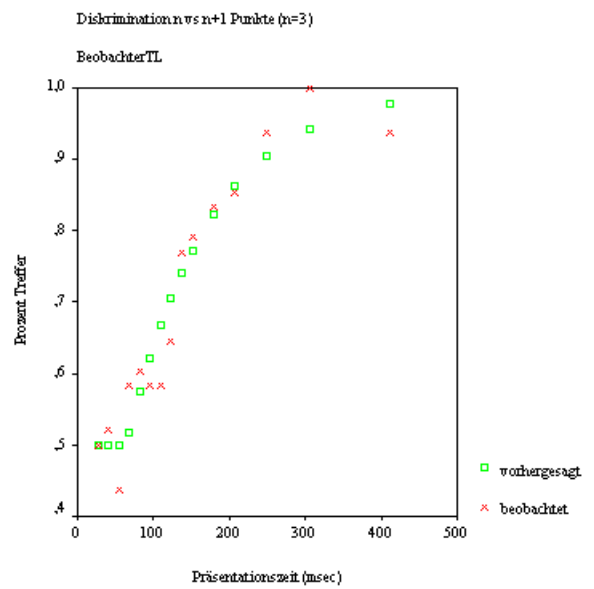


Abb.2e

Diskrimination n vs n+1 Punkte (n=4)

Beobachter TL

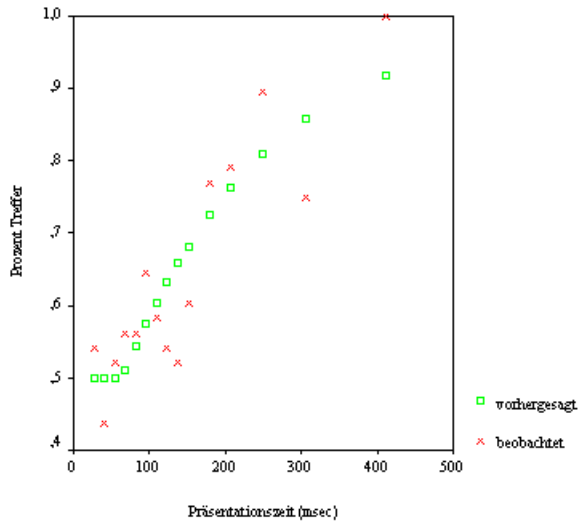


Abb. 2f

Diskrimination n vs n+1 Punkte (n=5)

Beobachter TL

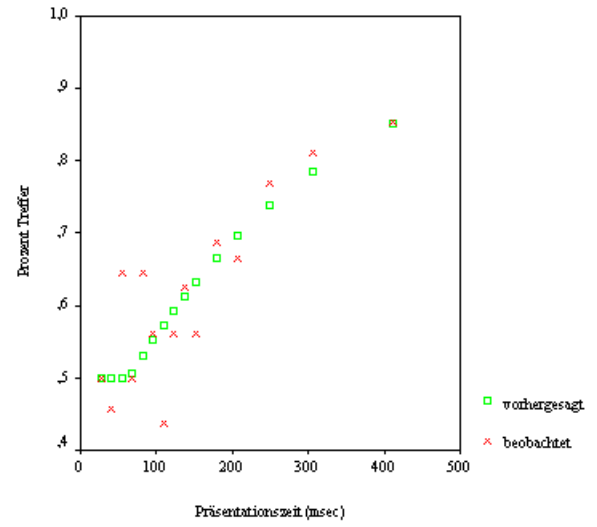
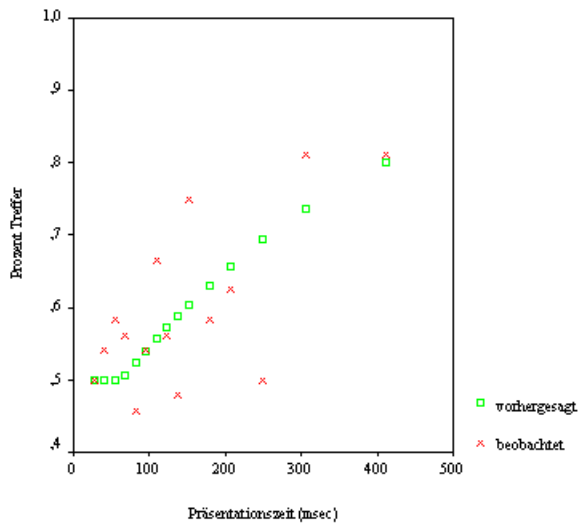


Abb. 2g

Diskrimination n vs n+1 Punkte (n=6)

Beobachter TL



Abbildungen 3 und 4:

Diskrimination von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)

Graphen der psychometrischen Funktionen

(Beobachter WM und TL)

(Experiment 1, Kapitel 3, S. 74)

Abb. 3

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=0, \dots, 6$)

Beobachter WM

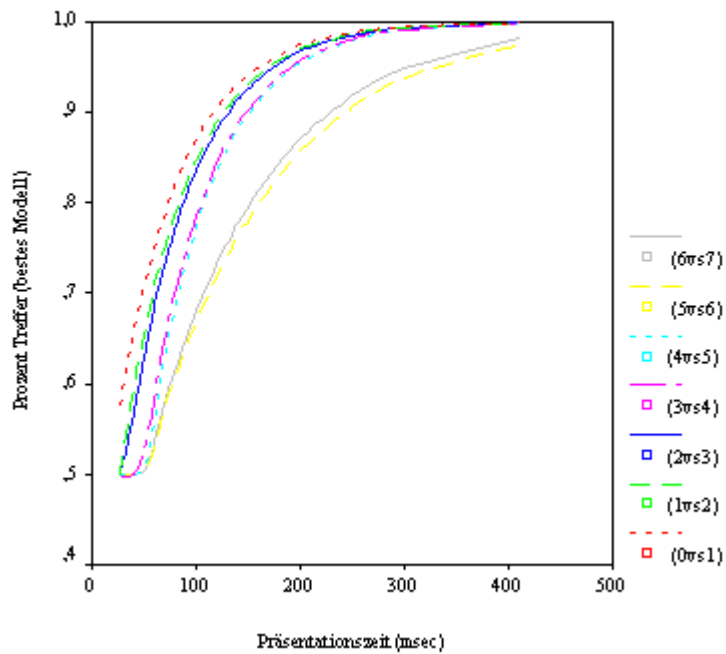
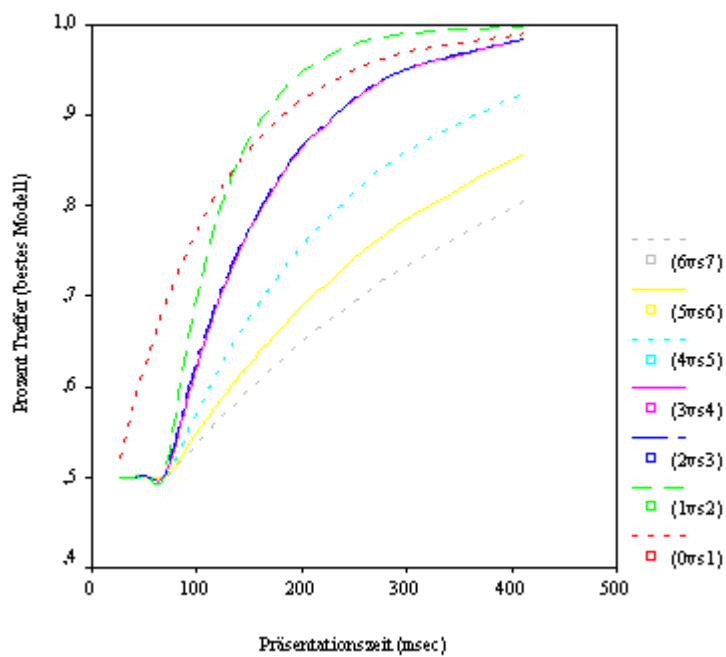


Abb. 4

Diskrimination n vs $n+1$ Punkte ($n=0, \dots, 6$)

Beobachter TL



Abbildungen 5a - 5g:

Identifikation von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)
(Beobachter WM)

(Experiment 2, Kapitel 3, S. 76)

Abb. 5a

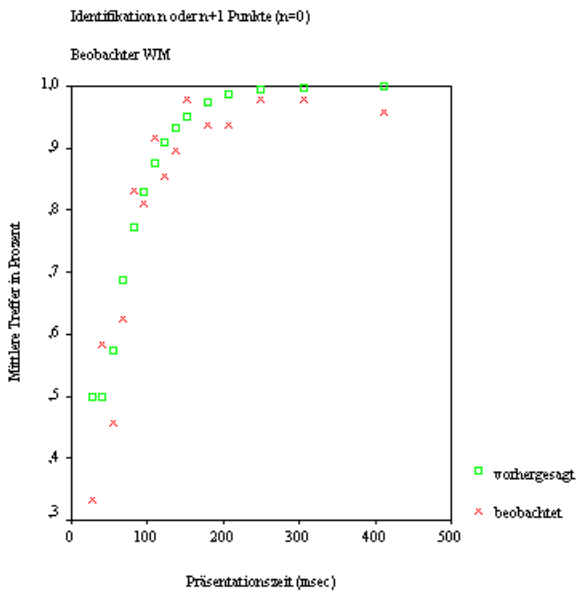


Abb. 5b

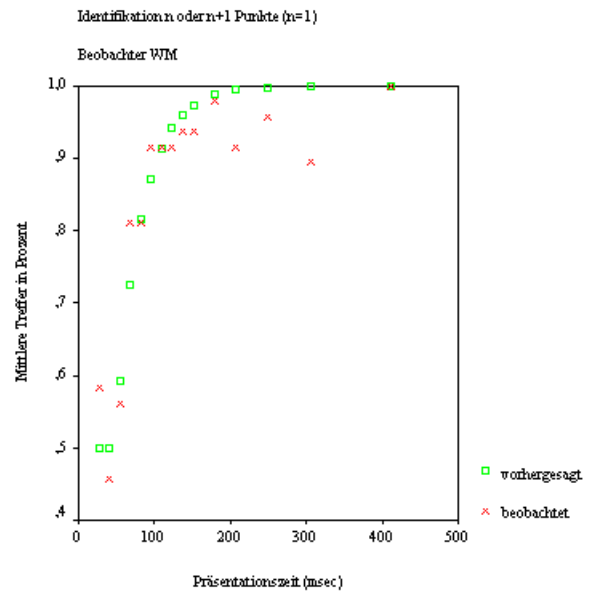


Abb. 5c

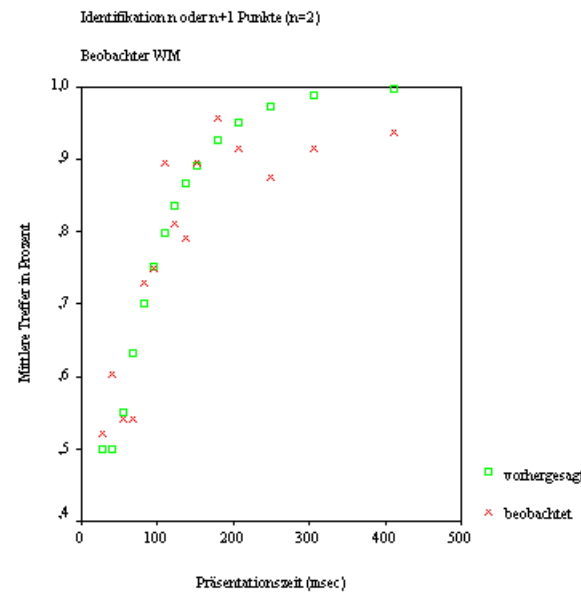


Abb. 5d

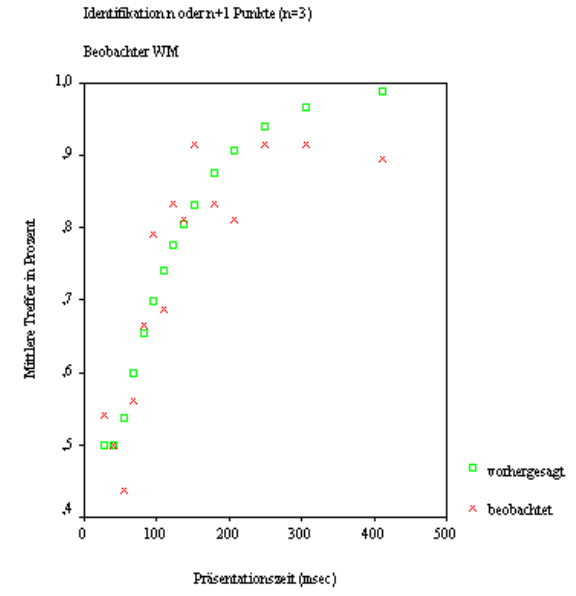


Abb. 5e

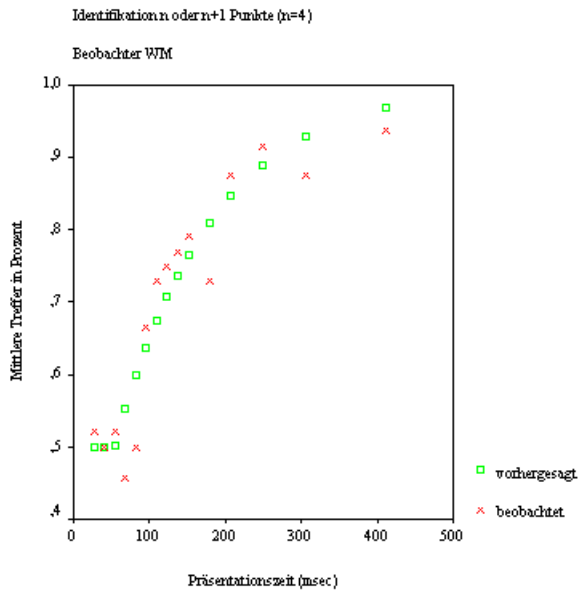


Abb. 5f

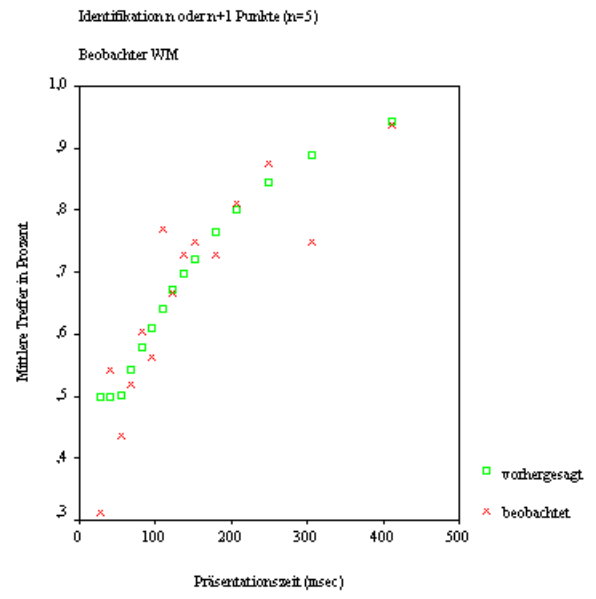
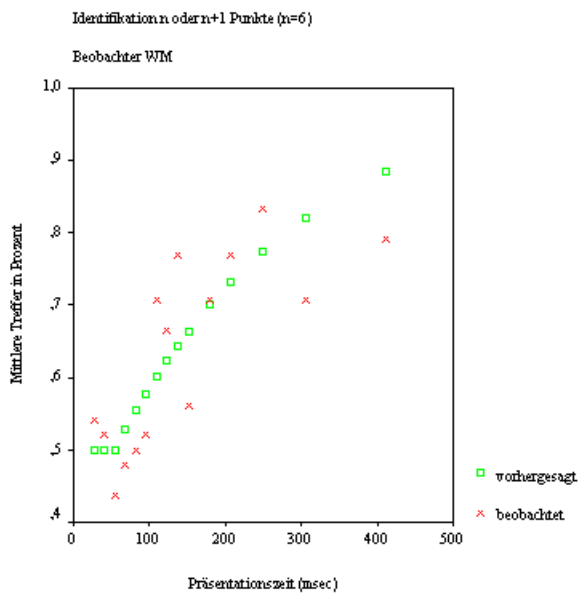


Abb. 5g



Abbildungen 6a - 6g:

Identifikation von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)
(Beobachter TL)

(Experiment 2, Kapitel 3, S. 76)

Abb. 6a

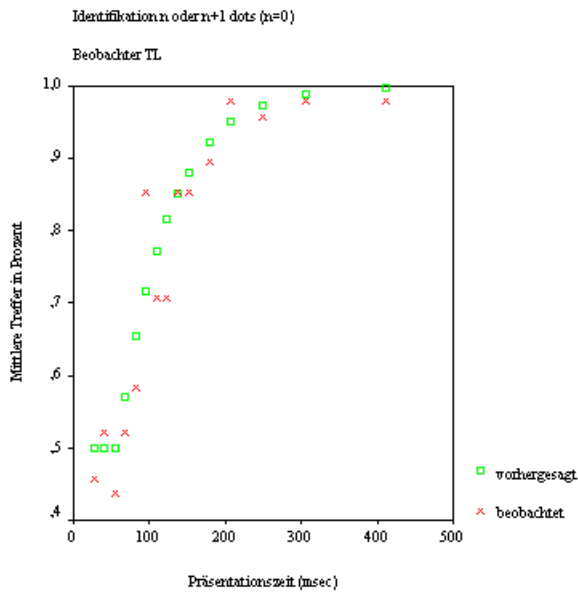


Abb. 6b

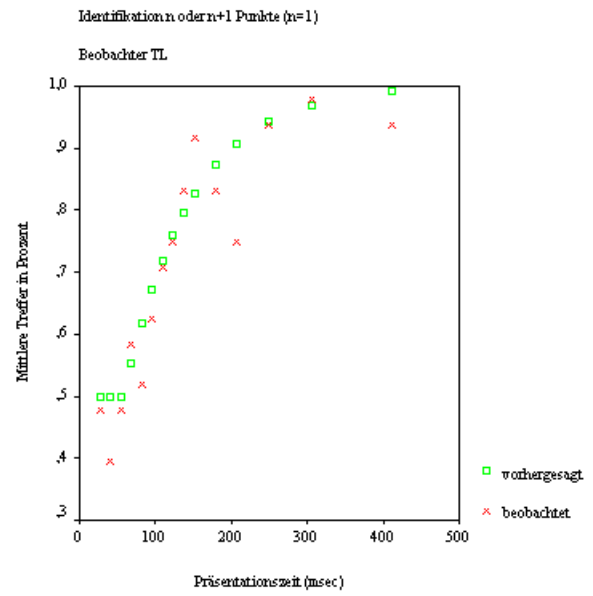


Abb. 6c

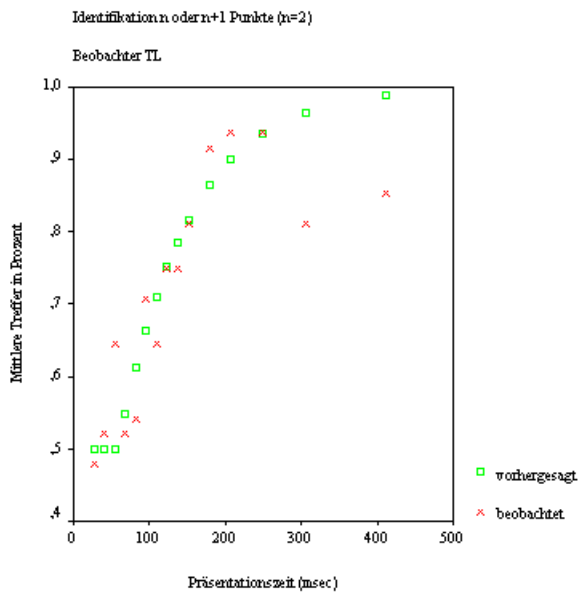


Abb. 6d

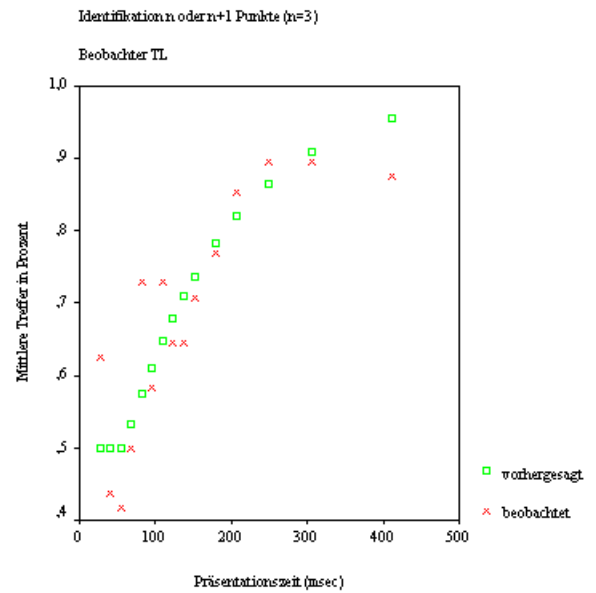


Abb.6e

Identifikation n odern+1 Punkte (n=4)

Beobachter TL

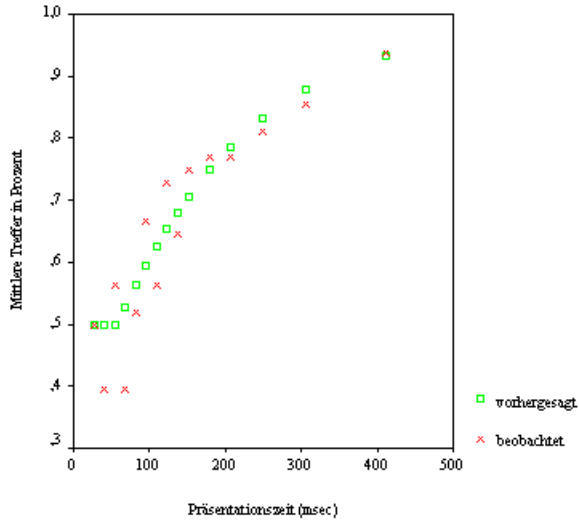


Abb. 6f

Identifikation n odern+1 Punkte (n=5)

Beobachter TL

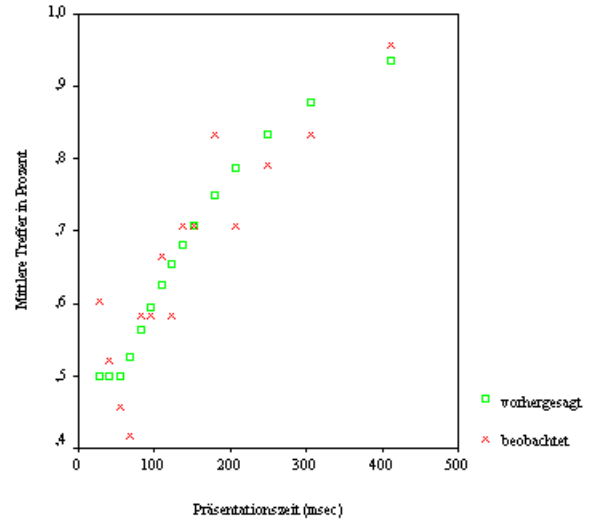
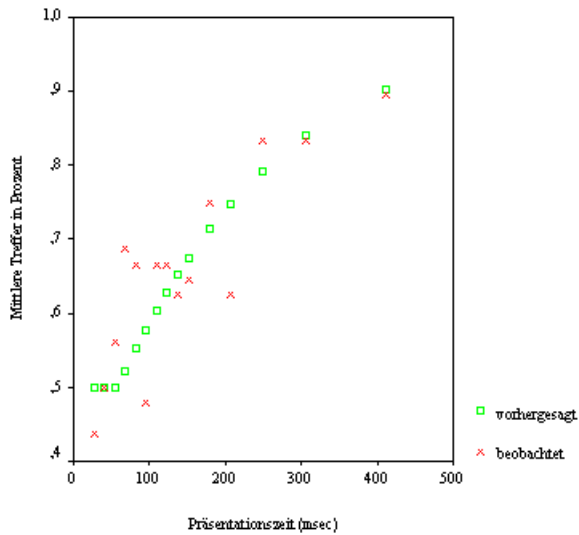


Abb.6g

Identifikation n odern+1 Punkte (n=6)

Beobachter TL



Abbildungen 7 und 8:

Identifikation von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)
Graphen der psychometrischen Funktionen
(Beobachter WM und TL)

(Experiment 2, Kapitel 3, S. 76)

Abbildungen 9 und 10:

Diskrimination von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)
Graphen der geschätzten Verarbeitungszeitbedarfsfunktionen
(Beobachter WM und TL)

(Experiment 1, Kapitel 3, S. 79)

Abb. 9

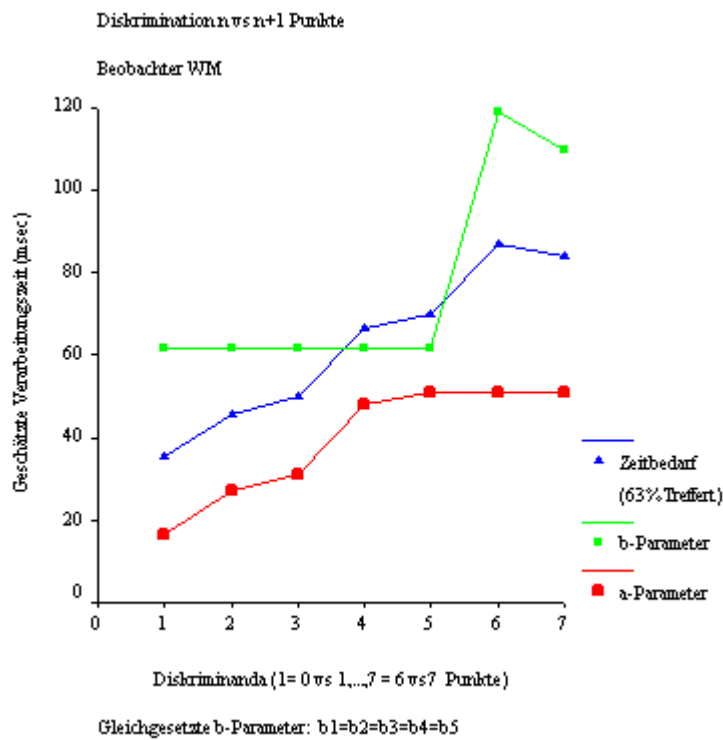
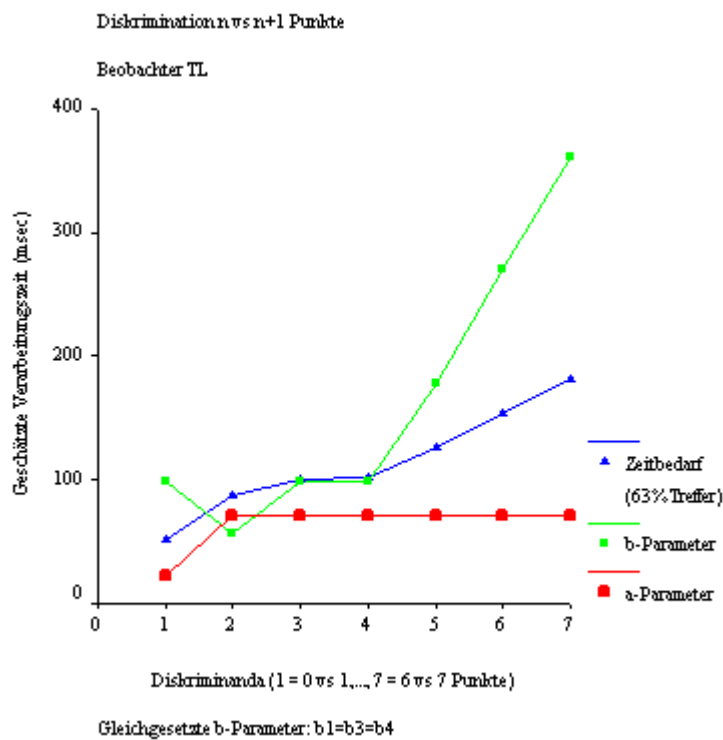


Abb. 10



Abbildungen 11 und 12:

Identifikation von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=6$)
Graphen der geschätzten Verarbeitungszeitbedarfsfunktionen
(Beobachter WM und TL)

(Experiment 2, Kapitel 3, S. 79)

Abb. 11

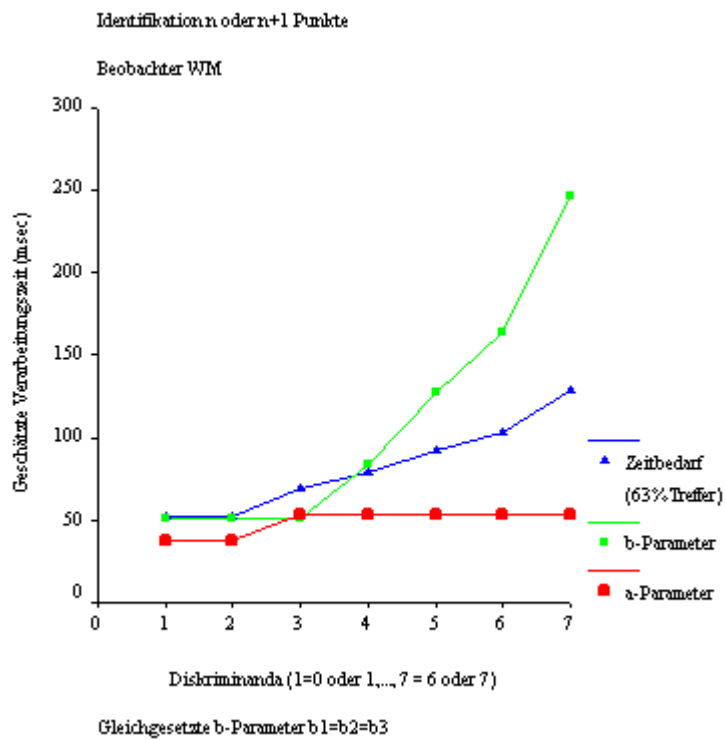
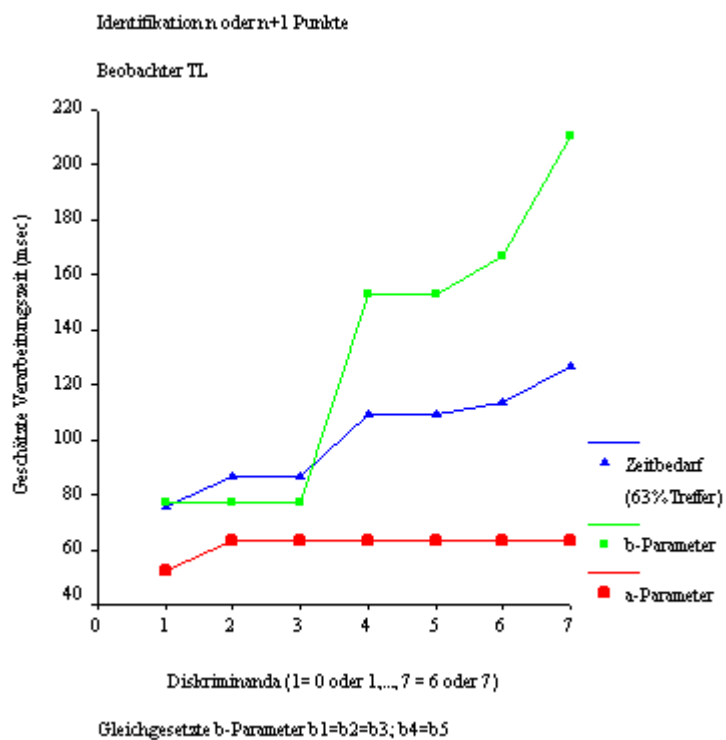


Abb. 12



Abbildungen 13 und 14:

Diskrimination von n vs $n+1$ Punkten ($n=0$ bis $n=7$)
Graphen der gemittelten psychometrischen Funktionen
(Jüngere Personen ($n=6$), ältere Personen ($n=6$))

(Experiment 3, Kapitel 3, S. 81)

Abb. 13

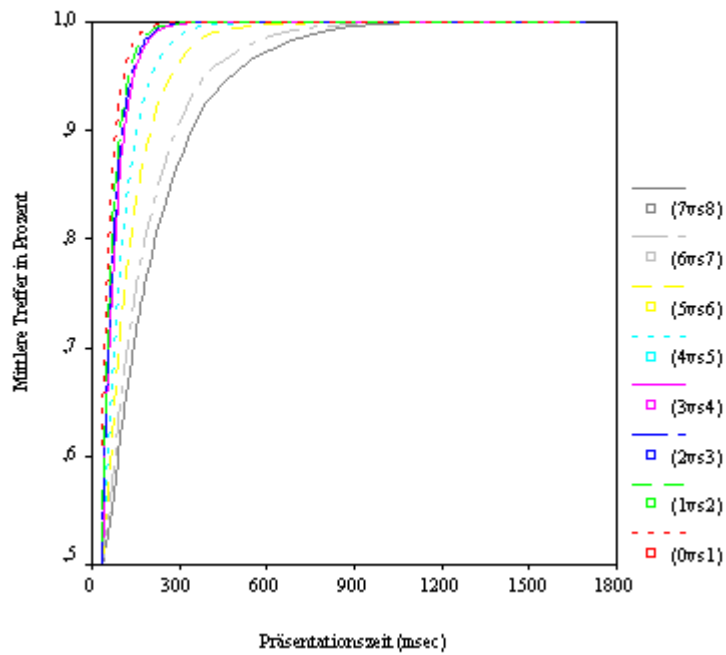
Discrimination n vs $n+1$ Punkte ($n = 0, \dots, 7$)Jüngere Personen ($n = 6$)

Abb. 14

Discrimination n vs $n+1$ Punkte ($n = 0, \dots, 7$)Ältere Personen ($n = 6$)