Bredenkamp, J., Klein, K.-M., Hayn, S. v., & Vaterrodt, B. (1988). Gedächtnispsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. *Sprache & Kognition, 7*, 69-83.

Gedächtnispsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers*

Jürgen Bredenkamp, Klaus-Martin Klein, Silvana von Hayn, Bianca Vaterrodt

Psychologisches Institut der Universität Bonn

Zusammenfassung. In diesem Artikel werden Untersuchungen an einem Rechenkünstler beschrieben, die sich auf verschiedene Komponenten seines Arbeitsgedächtnisses und das langfristige Erinnern von Zahlen beziehen. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

1) Nicht die Häufigkeit des Memorierens, sondern die Qualität der Verarbeitung ist für langfristiges Erinnern entscheidend.
2) Hinweise zur Vergessensinstruktion oder für deren Effektivität finden sich selbst dann nicht, wenn diese auf der Hand liegen. Dennoch ließ sich keine proaktive Hemmung nachweisen.
3) Retroaktive Hemmung dagegen ließ sich zeigen, wenn eine aktive Bearbeitung des Materials ausgeschaltet war.
4) Im Sternberg-Pradigma werden mehr Zahlen als Konsonanten pro sec verarbeitet. Nur bei Zahlen ist der Rechenkünstler anderen Pbn überlegen.
5) Die Gedächtnisspanne für Zahlen ist groß, die für Buchstaben durchschnittlich. Die Gedächtnisspanne für Zahlen ist nicht nach chunks, sondern nach der Anzahl der Ziffern begrenzt, die innerhalb einer begrenzten Zeitspanne bearbeitet werden können. Diese Zeitspanne ist größer als bei anderen Pbn.
6) Der symbolische Distanzeffekt tritt sowohl bei Zahlen als auch bei Buchstaben für alle Pbn auf. Nur für Zahlen findet der Vergleich bei dem Rechenkünstler schneller statt.

Die Ergebnisse werden auf dem Hintergrund seiner rechnerischen Fähigkeiten diskutiert, die er unabhängig von diesen Untersuchungen demonstriert hat (Bredenkamp, 1989).

Investigations of a mental calculation expert's memory.
Summary. In this article investigations of a mental calculation expert are described, which are concerned with various components of his working memory as well as with long-term remembering of numbers. The most important results are:

1) Not the frequency of memorizing, but the quality of processing determines long-term remembering.
2) The expert either does not instruct himself to forget or does not utilize cues to forget. In spite of that there was no evidence for proactive inhibition.
3) Retroactive inhibition was shown when active processing was impossible.
4) In Sternberg's paradigm the expert processes more digits than consonants per sec. Only with respect to digits the expert processes faster than other subjects.
5) The memory span for digits is large, for letters average. The digit span is not determined by a limited number of chunks but by the number of digits which can be processed within a limited space of time. This time seems to be larger than the one of other subjects.
6) The symbolic distance effect for digits and letters was shown to be valid for all subjects. Only the expert's comparison of numbers is less time-consuming than the comparison of other subjects.

The results are discussed with respect to his computational abilities which he has demonstrated independent of these investigations (Bredenkamp, 1989).

1. Einleitung

Im folgenden wird über gedächtnispsychologische Untersuchungen an einem Rechenkünstler (G.M.) berichtet, der verschiedene schwierige Rechenprobleme innerhalb kurzer Zeit im Kopf löst. Wie sich die Berechnung der 137. Wurzel aus einer 1000stelligen Zahl, die ihm ohne Hilfsmittel in weniger als einer Minute möglich ist, anhand seiner Aussagen und gezielter experimenteller Untersuchungen darstellt, ist andernorts ausführlich geschildert worden (Bredenkamp, 1989). Die Untersuchungen legen u.a. nahe, daß falsche Lösungen auf Verarbeitungsfehler im Arbeitsgedächtnis zurückzuführen sind. Verschiedenen Komponenten dieses Gedächtnissystems ist der vorliegende Beitrag gewidmet, wobei wir, Chase & Ericsson (1982) folgend, dem Arbeitsgedächtnis Kurzzeitgedächtnis- und Abrufprozesse zuordnen, die den Kontakt zur Wissensbasis herstellen.

Dargestellt werden hier Untersuchungen mit gut dokumentierten Paradigmen der Gedächtnispsychologie, zu denen wir teilweise bestimmte empirisch oder theoretisch begründete Erwartungen hatten. Wir beginnen allerdings unseren Bericht mit der Darstellung zweier Experimente, die kaum an anderen Pbn wiederholbar sein dürften, da sie ein prozedurales und faktisches Wissen im Gegenstandsbereich der Zahlen voraussetzen, über das nicht jeder verfügt. Dennoch prüfen diese Untersuchungen allgemeinpsychologische Gedächtnishypothesen über die Wirksamkeit bestimmter Verarbeitungsprozesse auf

* mit Unterstützung der DFG

langfristiges Erinnern, die allerdings für Zahlen bei vielen anderen Pbn keinen Anwendungsbereich haben dürften. Da eine dieser Untersuchungen u.a. die Interpretation nahelegt, der Rechenkünstler instruiere sich selbst dann nicht zum Vergessen, wenn dies naheliegt, gehen wir im Anschluß an diese Untersuchungen auf pro- und retroaktive Interferenz in Kurzzeitgedächtnisleistungen ein. Dann folgen die zusammenhängenden Darstellungen der Untersuchungen zur Gedächtnisspanne und im Sternberg-Paradigma, bevor wir abschließend auf die Experimente zum symbolischen Distanzeffekt für Buchstaben und Zahlen zu sprechen kommen.

In allen Untersuchungen, über die hier zu berichten ist, wurden die zu verarbeitenden Informationen auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage dargeboten. Waren Zeitmessungen notwendig, so wurden diese auf eine Millisekunde (msec) genau durchgeführt. Unser Pb war der 21 Jahre alte Student der Informatik G. M. Wenn möglich und notwendig, wurden auch andere Pbn (Studenten und Mitarbeiter) untersucht.

Wir beschreiben hier kurz unseren Pb G. M., der seinen eigenen Aussagen zufolge seit dem 4.–5. Lebensjahr mit rechnerischen Problemen durchschnittlich eine Stunde pro Tag beschäftigt ist. Diese Schätzung liegt möglicherweise noch zu niedrig, da ihn KFZ-Kennzeichen, Fernsehberichte mit Daten aus der Wirtschaft u.a.m. zum Rechnen anreizen. Die Beschäftigung mit Zahlen habe seine Aufmerksamkeit auch von den Unterrichtsfächern in der Schule abgezogen. Zahlen haben für ihn emotionale Qualität; keine sei für ihn indifferent. Im Bereich des Kopfrechnens bevorzugt er die Lösung von Wurzeln (z.B. 137. Wurzel aus 1000stelliger Zahl, 17. Wurzel aus 140stelliger Zahl, 13. Wurzel aus 100stelliger Zahl), die er ohne Hilfsmittel erreicht. Diese Probleme löst er mit bestimmten Regeln, die eine schnelle Bewältigung bei auffallend geringer Gedächtnisbelastung ermöglichen. Für die oftmals schwierig erscheinenden Zwischenrechnungen gibt es wieder vereinfachende Regeln. Zum Beispiel beherrscht er das von Rechenkünstlern bevorzugte Überkreuzmultiplizieren vorzüglich (vgl. Smith, 1983), weil er – seinen Aussagen zufolge als einziger Rechenkünstler – mit zweistelligen Zahlen operiert, deren Produkte er auswendig kennt. Festgelegt auf einen Lösungsweg ist der Rechenkünstler aber nicht. Mit der Aufgabe 637×748 konfrontiert, «sah» er sofort, daß $637 = 7 \times 7 \times 13$ und $748 = 2 \times 2 \times 11 \times 17$. Umgruppierung dieser Primzahlen führte zunächst zu $7 \times 13 \times 11 = 1001$; mit dieser Zahl läßt sich leicht multiplizieren. Das Produkt der noch fehlenden Primfaktoren ist 476, so daß die Lösung 476 476 lautet. Die Flexibilität im Einschlagen von Lösungswegen hat G. M. mehrfach demonstriert. Sein rechnerisches Denken ist nicht eingestellt.

G. M. war mit Wim Klein, dem wohl berühmtesten Rechenkünstler (vgl. Smith, 1983), bekannt. Er habe aber von Klein wenig gelernt, da er zum Zeitpunkt des Bekanntwerdens mit ihm selbst schon zu gut gewesen sei. Eine Durchsicht des Buches von Smith (1983), der das Vorgehen verschiedener Rechenkünstler ausführlich darstellt, bekräftigt den Eindruck, daß etliche Regeln, deren sich der Pb bedient, von ihm selbst erfunden oder verfeinert worden sind.

Der Beginn des Rechnens im 4. oder 5. Lebensjahr fällt nach Aussagen des Rechenkünstlers nicht in eine längere Krankheitsperiode. Auch Spielgefährten habe er immer gehabt. Seines Wissens gibt und gab es in seiner Familie und bei seinen Vorfahren keine Rechenkünstler oder Mathematiker.

Psychologischen Tests wollte der Rechenkünstler sich nicht unterziehen.

2. Verarbeitungsprozesse

Schon vor den Untersuchungen war aufgefallen, daß G. M. über ein vorzügliches langfristiges Gedächtnis für die Lösungen von Aufgabenstellungen verfügt, mit denen er früher einmal konfrontiert gewesen war. Diese Beobachtung führte zu der Frage, wodurch dieses ermöglicht werde. Die generelle Hypothese war, daß – im Sinne des levels of processing-Ansatzes – bestimmte Operationen, die mit den Zahlen durchgeführt werden, dauerhafte Gedächtnisspuren hinterlassen. Bei der Ausschaltung derartiger Operationen sollte dann erwartet werden können, daß die Gedächtnisleistung des Rechenkünstlers nur dem Zufallsniveau entspricht.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde zunächst Experiment 1 durchgeführt, das auch noch einem weiteren Zweck diente. Auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage wurde dem Pb zunächst eine Frage präsentiert: «Ist durch 2

(5, 10, 11, 13, 17) teilbar?» Eine Sekunde später wurde eine dreistellige Zahl präsentiert, und der Pb hatte eine «*Richtig*»-Taste zu drücken, wenn diese durch die vorweg dargebotene Zahl ohne Rest dividierbar war; ansonsten war eine «*Falsch*»-Taste zu drücken. Die Zeiten für die Betätigung der Tasten wurden auf eine Millisekunde genau gemessen. Nachdem auf diese Weise je 5 durch die angegebenen Zahlen ohne Rest dividierbare und nicht dividierbare dreistellige Zahlen in zufälliger Folge dargeboten worden waren, erfolgte 45 Minuten nach dieser Darbietung – das Zeitintervall war mit Gesprächen ausgefüllt – ein für den Pb überraschender Rekognitionstest. Jede zuvor dargebotene Zahl wurde mit einem Distraktor gepaart, und der Pb hatte zu entscheiden, welche dargeboten worden war. Jeder Distraktor wich nur bzgl. der letzten Ziffer von der anderen Zahl eines Paares ab.

Bei der Teilbarkeit durch 2, 5 oder 10 muß nur die letzte Ziffer beachtet werden, während bei der Teilbarkeit durch 11, 13 oder 17 elaboriertere Prozesse ablaufen. Demgemäß wurde erwartet, daß die Rekognition der durch 2, 5 oder 10 (nicht) teilbaren Zahlen nur auf Zufallsniveau, die der anderen Zahlen über dem Zufallsniveau liege. Diese Hypothesen wurden durch einseitige Binominaltests zum Niveau $\alpha = 0,05$ geprüft und bestätigt. Die Zahl der richtigen Rekognitionen liegt bei 63% (nicht signifikant) bzw. 80% (signifikant). Die Rekognitionsleistung von 80% nach 45 Minuten ist als ausgesprochen hoch anzusehen und bekräftigt die Vermutung, daß mit Zahlen durchgeführte Operationen die Erinnerungsleistung des Pb fördern. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die Auseinandersetzung mit den durch 11, 13 oder 17 (nicht) teilbaren Zahlen im Durchschnitt etwas mehr als eine Sekunde länger als die Bearbeitung der anderen Zahlen gedauert hat; die Antworten auch auf die zuerst genannten Zahlen erfolgten so schnell (weniger als 2 Sekunden), daß eine Vergleichsuntersuchung zur Erinnerungsleistung anderer Pbn nicht in Frage kam. Angesichts der kurzen Bearbeitungszeit ist die Gedächtnisleistung des Pb als außerordentlich hoch zu bewerten.

Gleichzeitig sollte das Experiment 1 noch einem anderen Zweck dienen. Mit der Frage «Ist durch 2 teilbar?» wird eine aus 5 Zahlenendungen bestehende Menge (0, 2, 4, 6, 8) aktiviert, und der Pb soll entscheiden, ob die nachfolgende Zahlenendung zu dieser Menge gehört. Mit den Fragen «Ist durch 5 (bzw. 10) teilbar?» werden geringere Mengen vom Umfang 2 oder 1 aktiviert. Wir haben uns gefragt, ob ähnlich wie beim Sternberg-Paradigma (Sternberg, 1966) die Beantwortungszeit linear mit der Größe des memory set steigt. Um die Zahl der items nicht zu klein werden zu lassen, wurden die für «richtig» und «falsch» benötigten Zeiten nicht, wie bei Sternberg, getrennt analysiert. Das Ergebnis spricht dafür, daß die Zeiten nicht mit der Größe des memory set variieren, was für eine parallele Verarbeitung (statt einer seriellen Suche) sprechen könnte. Briggs und Blaha (1969) haben im Sternberg-Paradigma gezeigt, daß mit zunehmender Übung der lineare Anstieg der Zeiten mit der Größe des memory set immer kleiner wird, und hier könnte der Fall aufgetreten sein, daß die vielen Rechenerfahrungen unseres Pb dazu geführt haben, daß der Anstieg Null geworden ist. Allerdings liegt hier nur eine gewisse Verwandtschaft zum Sternberg-Paradigma vor, und wir haben unseren Pb auch in diesem Paradigma untersucht.

Die Wirksamkeit von Verarbeitungsprozessen wurde in einem weiteren Experiment untersucht, das, mit Modifikationen, der Untersuchung 1 von Craik und Watkins (1973) nachgebildet war. Untersucht werden sollte, ob die Häufigkeit des Memorierens oder andere Verarbeitungsprozesse sich auf die Gedächtnisleistung auswirken. Dem Pb wurden auf dem Monitor einer Versuchssteuerungsanlage sukzessive dreistellige Zahlen aus dem Bereich 200–999 jeweils eine Sekunde lang dargeboten. Insgesamt handelte es sich um 400 Zahlen, die auf 16 Listen zu je 25 Zahlen aufgeteilt waren. Jede Liste bestand aus 12–13 geraden und 12–13 ungeraden Zahlen mit demselben Hunderter. Eine bis vier der ungeraden Zahlen je Liste waren prim. Die Aufgabe des Pb bestand darin, jeweils auf die Primzahlen zu achten und auf die Frage «*letzte Primzahl?*», die am Listenende erschien, zu antworten. Die Primzahlen waren so auf die Positionen innerhalb jeder Liste verteilt worden, daß vier unterschiedliche Memorierfrequenzen resultieren mußten, vorausgesetzt, die Primzahlen wurden als solche erkannt (Häufigkeit des Memorierens 0, 3, 7, 11 für je 10 Primzahlen). So wird der Pb, wenn die von ihm als solche erkannte Primzahl als letzte Primzahl in der Liste an 22. Stelle vorkommt, diese dreimal

Tabelle 1: Positionen und Memorierhäufigkeit der Primzahlen.

Häufigkeit des Memorierens	Position 1	2	5	6	8	9	10	13	14	17	18	21	22	25
0	1		2					1		1		1		4
3	1	1						1	1			2	4	
7	2	1		2						1	4			
11				1	1	2	2		4					

memorieren, um sie für die Bewältigung der gestellten Aufgabe im Gedächtnis zu behalten. Die Positionen der Primzahlen mit unterschiedlicher Memorierhäufigkeit zeigt Tabelle 1. Eine Konfundierung der Position mit der Memorierhäufigkeit ließ sich nicht vermeiden. Die durchschnittlichen Positionen für die Memorierfrequenzen 0 und 3 liegen bei 16, die der beiden anderen Frequenzen bei 11.

Nach der letzten Liste folgte völlig überraschend ein Reproduktionstest. Der Pb sollte alle Zahlen nennen, die ihm im Gedächtnis geblieben waren. Daran schloß sich ein Rekognitionstest an. Dieser war so aufgebaut, daß jede der 40 Primzahlen des Versuchs mit einem Distraktor (ebenfalls Primzahl mit demselben Hunderter) vorgelegt wurde. Der Pb hatte zu entscheiden, welche Zahl dargeboten worden war. Außerdem wurden je 40 der dargebotenen geraden und ungeraden Zahlen, die nicht prim sind, mit jeweils einem Distraktor vorgelegt (ebenfalls jeweils gerade oder ungerade mit demselben Hunderter). Die Hunderter 2 bis 9 waren je fünfmal vertreten.

Wir hatten folgende Hypothesen zu diesem Experiment 2:

1) Die Aufgabe verlangt während der Darbietung eine Entscheidung darüber, ob eine ungerade Zahl prim ist oder nicht. Diese Bearbeitung führt zu Gedächtnisleistungen, die für Primzahlen und ungerade Zahlen, die nicht prim sind, über dem Zufallsniveau, für gerade Zahlen auf dem Zufallsniveau liegen sollten.
2) Laut Craik und Watkins (1973) sollte die Häufigkeit des Memorierens per se keine Rolle für die Gedächtnisleistung spielen. Trifft diese Annahme für diesen Versuch zu, sollte gelten:
   a) Es gibt keine Unterschiede in der Gedächtnisleistung zwischen den Primzahlen und den anderen ungeraden Zahlen, die nicht memoriert werden.
   b) Für die Primzahlen gilt, daß die Gedächtnisleistung nicht von der Frequenz des Memorierens abhängig ist.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Bei der Darstellung der Reproduktionsergebnisse wurde berücksichtigt, daß eine Aufzählung aller Zahlen des Bereiches,

Tabelle 2: Ergebnisse des Rekognitionstests.

	Primzahlen	ungerade Zahlen	gerade Zahlen
richtig	26	26	19
falsch	14	14	21

Tabelle 3: Ergebnisse der Reproduktion.

a) Primzahlen

	dargeboten	nicht dargeboten
reproduziert	13	10
nicht reproduziert	27	72

b) ungerade Zahlen

	dargeboten	nicht dargeboten
reproduziert	50	18
nicht reproduziert	110	100

c) gerade Zahlen

	dargeboten	nicht dargeboten
reproduziert	7	6
nicht reproduziert	193	194

dem sie entnommen wurden, zu perfekten Reproduktionen führen muß, wenn nicht die Häufigkeit der fälschlichen Reproduktion nicht dargebotener Zahlen in Betracht gezogen wird.

Einseitige Binominaltests zum Niveau $\alpha = 0{,}05$ zeigen, daß entsprechend Hypothese 1 die ungeraden Zahlen unabhängig davon, ob sie prim sind oder nicht, überzufällig gut wiedererkannt wurden; für die geraden Zahlen ist dies nicht der Fall. Analysiert man unter der Annahme zweier Normalverteilungen mit gleichen Varianzen die Reproduktionsdaten signalentdeckungs-theoretisch, ergibt sich für die geraden Zahlen $d' = 0$. Für die Primzahlen ergibt sich $d' = 0{,}72$, für die anderen ungeraden Zahlen $d' = 0{,}54$. Eine Analyse der response biases zeigt jeweils eine Voreingenommenheit gegen die Hypothese «dargeboten». Auch annahmeärmere Korrelationsanalysen zeigen deutlich, daß von unterschiedlichen Gedächtnisleistungen für ungerade und gerade Zahlen auszugehen ist.

Sind die Gedächtnisleistungen für die Prim- und anderen ungeraden Zahlen unterschiedlich? Für die Rekognitionsleistungen ist diese Frage eindeutig zu verneinen. Zur Beantwortung der Frage in bezug auf die Reproduktionsleistung haben wir folgenden Ansatz gewählt. Laut Tabelle II bei Elliott (1964) wurden die Rekognitionswahrscheinlichkeiten in d'-Werte umgerechnet. Es resultiert d' =0,54 für Prim- und andere ungerade Zahlen. Unter der Hypothese, daß (richtig oder falsch) reproduziert wird, wenn die Zahl (richtig oder falsch) wiedererkannt worden ist, und daß eine Reproduktion (richtig oder falsch) unterbleibt, wenn die Zahl (richtig oder falsch) als nicht vorgekommen beurteilt worden ist, lassen sich aus den d'-Werten für die Rekognition die Treffer und Fehler des Reproduktionsteils prognostizieren, wenn die bekannte falsche Alarmrate berücksichtigt wird. Es resultieren für Prim- und andere ungerade Zahlen insignifikante χ^2-Werte von 0,88 und 0. Das spricht für gleiche Rekognitions- und Reproduktionsleistungen und damit auch dafür, daß die Reproduktionsleistungen für Prim- und andere ungerade Zahlen gleich sind. Bemerkenswert ist, daß sich an diesen Zusammenhängen absolut nichts ändert, wenn nur die Primzahlen berücksichtigt werden, die nicht an letzter Stelle einer Liste standen. Für deren Reproduktion ergibt sich d' =0,73, ein Wert, der dem für alle Primzahlen entspricht. Obwohl für die nicht an letzter Stelle einer Liste stehenden Primzahlen ganz offenkundig die Möglichkeit zu einer Vergessensinstruktion vorlag (vgl. Bjork, 1972), wurde diese nicht vorgenommen oder blieb unwirksam.

Zu erörtern bleibt, wie sich die Häufigkeit des Memorierens der Primzahlen auf die Gedächtnisleistung auswirkt. Zunächst sei festgestellt, daß anhand der als letzte Primzahl einer Liste genannten Zahlen ermittelt werden konnte, ob der Proband in der Lage war, Primzahlen überhaupt als solche zu erkennen. Dies war eindeutig der Fall. 12 der 16 jeweils in einer Liste als letzte Primzahl vorkommenden Zahlen wurden richtig benannt. Mit und ohne Berücksichtigung dieser Zahlen ergeben sich jeweils schwach ausgeprägte negative Korrelationen zwischen der Häufigkeit des Memorierens und der Rekognition bzw. Reproduktion einer Primzahl (Variationsweite r = 0,00 bis r = –0,22). Da mit der Häufigkeit des Memorierens die Position einer Primzahl in der Liste korreliert ist, wurde geprüft, ob zwischen den Memorierhäufigkeiten 0 und 3 (gleiche durchschnittliche Positionen) bzw. 7 und 11 (ebenfalls gleiche durchschnittliche Positionen) Unterschiede in der Gedächtnisleistung zu verzeichnen sind. Dies ist weder bzgl. der Rekognitions- noch der Reproduktionsleistung der Fall. Die Häufigkeit des Memorierens ist eine vom Experimentator definierte Variable. Wie häufig tatsächlich memoriert wurde, hängt davon ab, ob der Pb die Primzahlen richtig erkannt und auch dann (in Erwartung weiterer Primzahlen) memoriert hat, wenn sie früh in einer Liste auftauchten. Vollständig kontrollierbar ist das nicht, aber den Aussagen des Pb zufolge ist von einem instruktionsgemäßen Vorgehen auszugehen. Wenn auch nur einige Primzahlen memoriert worden sind, hätten bei Richtigkeit der Annahme, daß die Häufigkeit des Memorierens ausschlaggebend für die Gedächtnisleistung ist, diese besser als die anderen ungeraden Zahlen erinnert werden müssen. Dies war aber nicht der Fall.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Art der Auseinandersetzung mit Zahlen, nicht die Häufigkeit des Memorierens, das langfristige Erinnern ermöglicht. Auch für andere Lernmaterialien ist gezeigt worden, daß die Häufigkeit des Memorierens per se langfristiges Erinnern nicht begünstigt (Craik & Watkins, 1973; Shimizu, 1987). Zu diesen Ergebnissen paßt der mit Zahlen am Rechenkünstler erzielte Befund.

3. Interferenzexperimente

Die in Abschnitt 2 geschilderten Experimente belegen, daß elaborierte Verarbeitungsprozesse zu langfristigen Gedächtnisleistungen führen, obwohl die Darbietung vieler ähnlicher Zahlen Interferenzen erzeugen sollte. Durch kognitiv tiefe Verarbeitungen kann diesen Interferenzen vorgebeugt werden. Für das schnelle Vergessen von items, die nicht memoriert oder aktiv bearbeitet werden können, werden üblicherweise Interferenzprozesse verantwortlich gemacht. In Experiment 3 wurde geprüft, ob retroaktive Hemmung bei unserem Pb auftritt, wenn die aktive Bearbeitung von Zahlen unmöglich gemacht wird. Ferner wurde geprüft, ob die Hemmung, falls sie auftritt, eine Funktion der verstreichenden Zeit oder der Zahl interferierender Ziffern ist. Das Experiment wurde mit Modifikationen dem probe-digit-Experiment von Waugh und Norman (1965) nachgebildet. Die hauptsächliche Abänderung bestand darin, daß wegen der großen Gedächtnisspanne des Pb, die vorher untersucht worden war (vgl. Abschnitt 4.), je Liste dreißig Ziffern auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage dargeboten wurden. Dem Pb wurden sukzessive achtzig derartige Listen präsentiert, wobei in der Hälfte aller Fälle 2 Ziffern pro sec, in der anderen Hälfte 4 Ziffern pro sec dargeboten wurden. Diese Präsentationsraten waren pro Liste konstant und über die Listen zufällig verteilt. Jede der Ziffern Null bis Neun trat in jeder Liste dreimal auf. Die letzte Ziffer war eine probe-digit, die auf dem Bildschirm mit einem Pfeil gekennzeichnet war. Sie gab dem Pb an, die Ziffer zu reproduzieren, die der probe-digit als letzte gefolgt war. Hierbei handelte es sich jedesmal um eine Ziffer, die sich von der anderen der probe-digit folgenden Zahl unterschied. Jede Ziffer fungierte je achtmal als probe-digit, und jede Ziffer war je achtmal die zu reproduzierende. Die zu reproduzierenden Ziffern standen je zehnmal (fünfmal unter der Bedingung «Präsentationsrate 2 Ziffern pro sec», fünfmal unter der Bedingung «Präsentationsrate 4 Ziffern pro sec») in den Positionen 6, 14, 18, 22, 24, 26, 28, 29. Die Zahl der interferierenden Ziffern beträgt also z.B. 2, wenn die zu reproduzierende Zahl in der Position 28 auftritt. Für jede Position gilt, daß bei einer Präsentationsrate von 2 Ziffern pro sec das Zeitintervall bis zur Reproduktion doppelt so lang ist wie bei der anderen Präsentationsrate.

Da wir davon ausgingen, daß vorexperimentell erworbenes Zahlenwissen in diesem Fall nicht hilfreich sein könnte und auch tief gehende Verarbeitungsprozesse unmöglich sein würden, sind 2 andere Pbn (Studenten der Psychologie) ebenfalls untersucht worden. Alle Pbn wurden dahingehend instruiert, daß es keinen Zweck habe, «die Ziffern während der Darbietung gruppieren zu wollen, da sie in schneller Aufeinanderfolge zufällig geordnet dargeboten werden und jede Ziffernfolge bzgl. ihrer Länge Ihre Gedächtnisspanne übertrifft».

Die Ergebnisse sind recht eindeutig. Die Pbn reproduzieren insgesamt 25%, 27,5% und 27,5% der Ziffern. Unter der Hypothese, daß geraten wird, sind 11,11% richtige Reproduktionen zu erwarten ($p = 1/9$, da die zu reproduzierende Ziffer niemals der probe-digit entsprach). In jedem Fall weicht die Reproduktionshäufigkeit vom Zufallsniveau statistisch bedeutsam ab ($\alpha = 0{,}05$). Die Zeit, die zwischen der Darbietung und der Reproduktion verstreicht, scheint bei Konstanthaltung der Zahl interferierender Ziffern überhaupt keine Rolle zu spielen. Im Durchschnitt werden bei der Präsentationsrate von 2 Ziffern pro sec 28,3%, bei der Präsentationsrate von 4 Ziffern pro sec 25% aller Zahlen richtig reproduziert. Dagegen läßt sich der Einfluß interferierender Ziffern klar belegen. Tabelle 4 zeigt die durchschnittlichen Reproduktionswerte, die recht genau den einzelnen Werten entsprechen; die Unterschiede zwischen den Pbn waren erwartungsgemäß minimal. Insgesamt scheinen die Ergebnisse der Interferenz-, nicht aber der Spurenzerfalltheorie zu entsprechen.

Tabelle 4: Reproduktionswerte in Abhängigkeit von der Position.

	Positionen			
	29;28	26;24	22;18	14;6
Wahrscheinlichkeit richtigen Reproduzierens	0,47	0,32	0,22	0,07
Wahrscheinlichkeit eines proaktiven Interferenzfehlers	0,1875	0,10	0,13	0,07

Bei einer genaueren Analyse der Befunde, die die Transformation der Reproduktionswahrscheinlichkeiten in d'-Werte voraussetzt (vgl. Elliott, 1964, Tab. II), kommen aber Zweifel auf. Diese Analyse folgt Massaros (1975, S. 556ff.) Reanalyse der Waugh-Norman-Daten. Genau wie dort zeigt sich, daß für jede Zeitbedingung log d' linear mit der Zahl interferierender items fällt. Aber die beiden linearen Funktionen unterscheiden sich. Genau wie bei den Waugh-Norman-Daten ist der Ordinatenabschnitt für die Darbietungsbedingung «4 Ziffern pro sec» niedriger, was dafür spricht, daß die Stärke der Gedächtnisspur sofort nach der Darbietung um so geringer ist, je kürzer die Darbietung erfolgte. Wie bei Waugh & Norman (1965) ist aber der Abfall der Stärke der Gedächtnisspur mit der Zahl der interferierenden items unter der Darbietungsbedingung «4 Ziffern pro sec» weniger stark ausgeprägt. Diese Ergebnisse kann eine Interferenztheorie allein nicht erklären (vgl. auch Massaro, 1975).

Bis auf die Bedingungen «ein oder zwei interferierende Ziffern» stimmen die Reproduktionswahrscheinlichkeiten gut mit den von Waugh und Norman (1965) publizierten überein. Die Abweichung drückt sich auch in den weit geringeren d'-Werten unserer Untersuchung aus. Waugh & Norman haben im Unterschied zu uns die Zahlen akustisch dargeboten, und sie haben ihre Versuche auf 6 experimentelle Sitzungen verteilt, während in unserer Untersuchung alle Listen in einer Sitzung durchzugehen waren. Dieses Vorgehen legt die Möglichkeit proaktiver Hemmung nahe. Wir haben auf verschiedene Weise überprüft, ob proaktive Hemmung aufgetreten ist. Zunächst wurden die Reproduktionswahrscheinlichkeiten für Blöcke von je 16 Listen errechnet; das Experiment war bereits so gestaltet worden, daß in jedem Block die insgesamt 16 Bedingungen (2 Zeit- mal 8 Positionsbedingungen) je einmal realisiert waren. Die Reproduktionshäufigkeiten sind jedoch innerhalb der aufeinanderfolgenden Blöcke gleich ($\chi^2 = 1{,}78$, $df = 4$, $p > 0.05$). Dies spricht nicht für proaktive Hemmung.

Spezifischer wurde die Hypothese, daß proaktive Hemmung entstanden ist, wie folgt geprüft. Der Versuch folgt dem A–B, A–C-Paradigma, da der probe-digit zwei verschiedene Zahlen folgen. Die zweite soll reproduziert werden, so daß ein Paradigma zur Erzeugung proaktiver Hemmung vorliegt. Geprüft wurde, wie häufig die erste Ziffer fälschlich genannt wurde. Die Ergebnisse finden sich in der letzten Zeile der Tabelle 4. Der Tendenz nach liegt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für proaktive Interferenz (Zufallsniveau = 0,1111) bei den Positionen 28 und 29 vor; signifikant ist dieser Wert aber nicht. Er dürfte nicht ausreichen, um die Abweichung von den Waugh-Norman-Daten zu erklären. Auch die Antwortzeit ist für die proaktiven Fehler in den Positionen 28 und 29 leicht, aber statistisch nicht bedeutsam, erhöht.

Kurz geschildert werden soll ein weiteres Experiment 4 zur proaktiven Hemmung. Dem Rechenkünstler wurde eine Sekunde lang eine dreistellige Zahl dargeboten, danach 7 Wörter, die teils richtig, teils falsch geschrieben waren. Die Wörter waren durch Tastendruck als richtig oder falsch zu kennzeichnen. Danach folgte die Reproduktion (Zeitintervall: 14 sec), der die Darbietung einer weiteren Zahl folgte usw. Die ersten 40 Zahlen waren gerade, die zweiten 40 Zahlen ungerade, aber nicht prim. Die letzten 40 Zahlen waren prim. Wir erwarteten proaktive Hemmungen und Reduktionen dieser Hemmungen aufgrund des Materialwechsels. Obwohl der Pb über 80% der Wörter richtig klassifizierte, zeigten sich keinerlei Anzeichen von proaktiver Hemmung. Die Reproduktionswahrscheinlichkeit betrug 0.95. Weitere Untersuchungen mit anderen Pbn stehen noch aus.

In beiden Experimenten konnte keine proaktive Hemmung nachgewiesen werden. Unter der Hypothese, daß er sich nicht zum Vergessen instruiert oder diese Instruktion unwirksam bleibt, war für den Rechenkünstler proaktive Hemmung in Experiment 4 erwartet worden, das eine implizite Aufforderung zum Vergessen nach jeder Reproduktion enthält (vgl. Bjork, 1972). Möglich erscheint, daß trotz der beanspruchenden Distraktor-Aufgabe die Zahlen memoriert werden konnten, weil diese Tätigkeit bei dem Rechenkünstler wenig Prozeßkapazität beansprucht. Eine andere Möglichkeit, nach der hier tatsächlich eine Instruktion zum Vergessen effektiv vorgenommen wurde, erscheint wenig plausibel, da sie in Experiment 2 viel deutlicher bestand. Ebenfalls möglich ist, daß bei dem Rechenkünstler die Gedächtnisspur relativ lange persistiert, wenn das Zeitintervall nicht durch die Bearbeitung formal ähnlicher items ausgefüllt ist, die zu retroaktiver Hemmung führen. Wie der Befund zu erklären ist, bleibt also ungewiß. Der Befund selbst allerdings ist nicht einzigartig: Auch Hunt & Love (1972) haben bei dem Gedächtniskünstler VP im Brown-Peterson-Paradigma, in dem gewöhnlich proaktive Hemmungen auftreten, diese nicht nachweisen können.

4. Gedächtnisspanne und Sternberg-Paradigma

4.1 Begründung der Versuche

Mehrere Gründe waren für die umfangreichen Untersuchungen dieses Abschnitts ausschlaggebend:

1) Cavanagh (1972) hat auf unterschiedliche Art und Weise begründet, daß folgender Zusammenhang zwischen der

Prozeßrate b_j im Sternberg-Paradigma und der Gedächtnisspanne S_j gelten müßte:

$$(1) \quad b_j = \frac{C}{S_j},$$

wobei C eine Konstante ist und b_j die Größe des linearen Anstiegs der Entscheidungszeit mit dem Umfang des memory set für das Lernmaterial j (z.B. Zahlen) bezeichnet. Eine der Begründungen geht von einer erschöpfenden seriellen Suche im Kurzzeitgedächtnis aus. Da heute umstritten ist, welchen Rückschluß auf die Art des Suchprozesses das typische Ergebnis im Sternberg-Paradigma zuläßt (vgl. Luce, 1986), gehen wir von einer anderen Begründung Cavanaghs (1972) aus, die zudem den Vorteil hat, mit neueren Ergebnissen zur Gedächtnissspanne kompatibel zu sein. Danach ist C die Zerfallszeit der Gedächtnisspur in dem System, welches im Sternberg-Paradigma untersucht wird. Cavanagh selbst hat schon 1972 darauf hingewiesen, daß nach dieser Begründung die Gedächtnisspanne nicht als Speicherkapazität, sondern als Anzahl der items angesehen werden muß, die, bevor die Gedächtnisspur zerfällt, genannt werden können. Diese Ansicht deckt sich voll mit neueren Forschungsergebnissen zur Gedächtnisspanne, wonach «the capacity of short-term store is not determined by a fixed number of items, bits or chunks, but by the limited time for which the verbal trace endures» (Schweikert & Boruff, 1986, p. 424). Allerdings sind die Schätzungen für die Dauer der Gedächtnisspur im Gedächtnisspannenversuch größer als der Wert für C, den Cavanagh (1972) und Puckett & Kausler (1984) ermittelt haben, so daß Schweikert & Boruff (1986) davon ausgehen, daß im Paradigma der Gedächtnisspanne und der Suche (Sternberg) verschiedene Subsysteme des Arbeitsgedächtnisses untersucht werden, die Informationen im Umfang einer Gedächtnisspanne zu bearbeiten vermögen. Für beide Systeme gilt, daß die Gedächtnisspanne gleich dem Produkt zweier Parameter ist: Zerfallszeit und Memorierrate bzw. Prozeßrate^{-1} (items pro sec $= 1/b_j$ im Sternberg-Paradigma). Mit dieser Sichtweise ist auch der zunächst rätselhaft anmutende Befund verträglich, daß die Gedächtnisspanne chinesischer Kinder und Studenten für Ziffern größer ist als die vergleichbarer amerikanischer Pbn. Nach den Untersuchungen von Stigler, Lee & Stevenson (1986) beansprucht aber das Aussprechen chinesischer Ziffern weniger Zeit, worauf dieser Befund offenbar zurückzuführen ist.

2) Cavanagh (1972) hat die Gültigkeit der Beziehung (1) überprüft, indem er aufgrund der publizierten Resultate anderer Autoren die durchschnittliche Prozeßrate im Sternberg-Paradigma (b_j) mit der durchschnittlichen reziproken Gedächtnisspanne S_j^{-1} über verschiedene Materialien korreliert hat. Die quadrierte Produktmoment-Korrelation beträgt 0.995, und die Regressionsgleichung lautet: $b_j = 2{,}8 + 243{,}2\ /S_j$. Der Ordinatenabschnitt liegt mit 2.8 msec befriedigend nahe am Erwartungswert Null.

Gilt die Beziehung (1) auch, wenn man über verschiedene Lernmaterialien innerhalb jedes Individuums oder über verschiedene Individuen korreliert? Die erste Frage haben Puckett & Kausler (1984) aufgrund ihrer Untersuchungen bejahen können, die zweite aber nicht. Allerdings scheinen uns ihre Ergebnisse aus verschiedenen Gründen nicht konklusiv zu sein. Ein Grund ist der, daß S_j und b_j (statt S_j^{-1} und b_j) über verschiedene Individuen korreliert wurden. Allerdings liegen die von diesen Autoren ermittelten Korrelationen in der zu erwartenden Richtung. Zweitens wurde die Prozeßrate im Sternberg-Paradigma nur für die memory sets 1, 2 und 3 untersucht, was zu wenig repräsentativen und besonders unzuverlässigen Schätzungen führen muß, wenn zudem nur hohe Ausreißerwerte ($t > 1499$ msec) eliminiert werden. Diese Elimination muß, wenn die Entscheidungszeit im Sternberg-Paradigma linear mit der Größe des memory set steigt, zu einer Unterschätzung der Prozeßrate (= Anstieg der Zeit mit der Größe des memory set) führen. Aus diesen und weiteren Gründen hielten wir es für geboten, ein Experiment 5 mit einigen Pbn durchzuführen, das eine Implikation der Beziehung (1) testet:

$$(2) \quad b_z = g b_k$$

wobei b_k und b_z die Prozeßraten für Konsonanten und Zahlen sind und g im Rahmen der Cavanagh-Hypothese als Verhältnis der Gedächtnisspannen für diese Materialien zu interpretieren ist. Dieser Versuch erschien notwendig, um auf dem Hintergrund seines Ergebnisses den Gedächtnisspannenversuch am Rechenkünstler (Experiment 6) interpretieren zu können.

3) Geht man von der Gültigkeit der Beziehung (1) aus, so könnte, falls der Rechenkünstler eine große Gedächtnisspanne für Zahlen aufweist, seine Prozeßrate sehr klein sein. Eine andere Möglichkeit wäre die, daß bei großer Gedächtnisspanne und «normaler» Prozeßrate die Konstante C größer als bei anderen Pbn ist. In diesem Fall wäre die Zerfallszeit größer als bei anderen Pbn, und es drängte sich die Frage auf, ob dieser Befund materialspezifisch nur für Zahlen besteht. Auch diese Fragen sollten durch die Untersuchungen beantwortet werden, um den Übungseffekt, den langjähriges Kopfrechnen möglicherweise hat, genauer lokalisieren zu können.

Die hier aufgeworfenen Fragen interessieren noch aus einem weiteren Grund. Briggs & Blaha (1969) haben gezeigt, daß aufgrund zunehmender Übung im Sternberg-Paradigma der Anstieg der Entscheidungszeit mit der Größe des memory set geringer wird, ohne den Wert Null zu erreichen. Auch der Gedächtniskünstler VP dürfte diesen Wert nicht erreicht haben, wenn man Figur 7 bei Hunt & Love (1972) inspiziert. Im Rahmen seines ACT-Modells hält Anderson (1982) diesen Wert aber für möglich, und unser Experiment 1 deutet diese Möglichkeit ebenfalls an. In diesem Fall wäre ein totaler Zusammenbruch der Beziehung (1) zu verzeichnen, und es interessierte, ob dieser bei dem Rechenkünstler nachweisbar sein würde.

4) Die Gedächtnisspanne für Zahlen war bei dem Rechenkünstler als vergleichsweise groß erwartet worden. Diese Erwartung ergab sich aufgrund des Berichts von Smith (1983), der das Vorgehen von Rechenkünstlern eingehend dokumentiert hat. Danach sagte Bidder, ein bekannter Rechenkünstler: «The number 763 is represented symbolically by three figures 7 - 6 - 3; but 763 is only one quantity, - one number - one idea...» (Smith 1983, p. 55). Eine derartige Aussage könnte vermuten lassen, daß große Gedächtnisspannen von Rechenkünstlern auf eine Einheitenbildung (chunking) zurückgehen: Die Zahl der chunks

ist wie bei anderen Personen begrenzt, aber der Umfang der chunks ist bei einem Rechenkünstler größer. Wir haben uns bemüht, diese Hypothese mit zu überprüfen, da sie im Gegensatz zu heutigen Erkenntnissen (z.B. Schweikert & Boruff, 1986) und damit auch zum Cavanagh-Ansatz steht, von dem wir ausgegangen sind.

5) Schließlich interessierte der Vergleich der Gedächtnisspanne des Rechenkünstlers zu anderen dokumentierten Werten. Vorweg sei mitgeteilt, daß sie für Zahlen etwas größer ist als die Professor Aitkens, eines bekannten Mathematikers und Rechenkünstlers (Hunter, 1977). Sie erreicht aber nicht die Werte der Pbn von Chase & Ericsson (1982) nach intensivem Training dieser Aufgabe. Sie entspricht der von VP (Hunt & Love, 1972) nach kurzer Übung, liegt aber höher als VP's Gedächtnisspanne vor dieser Übung.

Wir schließen, daß Erfahrungen im Kopfrechnen (wie auch ein spezielles Training) sich günstig auf die Gedächtnisspanne für Zahlen auswirkt. Was aber liegt hier vor? Wird die Prozeßrate so mitbeeinflußt, daß weiterhin von einer normalen Persistenz der Gedächtnisspur auszugehen ist, oder wird diese dauerhafter?

4.2 Sternberg-Paradigma

Experiment 5 bestand aus zwei zeitlich getrennten Untersuchungen mit Zahlen (Experiment 5a) und Konsonanten (Experiment 5b), an denen dieselben Pbn teilnahmen. Die Untersuchungen waren der von Sternberg (1966) nachgebildet. Auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage erschienen Zahlen- bzw. Konsonantenfolgen vom Umfang 1, 3 oder 5, wobei jede Zahl (jeder Konsonant) 1, 2 sec lang dargeboten wurde. Zwei Sekunden nach Darbietung des letzten items erfolgte die Präsentation des Testitems, das in der Hälfte der Fälle (je Individuum und Material 120 Durchgänge) zum memory set gehörte. «Richtige» und «falsche» Testitems sowie die Größe des memory set waren bzgl. ihrer Aufeinanderfolge je Individuum randomisiert. Die memory sets variierten von Versuch zu Versuch, wurden also nicht konstant gehalten.

Für die Regressionsanalysen wurden die selten auftretenden unrichtigen Antworten eliminiert. Zusätzlich haben wir einem Vorschlag Tukeys (1977) folgend die ebenfalls selten auftretenden Ausreißerwerte eliminiert. Als Ausreißer ist eine Zeit definiert, die größer als $Q_3 + 1.5\ (Q_3 - Q_1)$ oder kleiner als $Q_1 - 1.5\ (Q_3 - Q_1)$ ist, wobei Q_1 und Q_3 das erste bzw. dritte Quartil einer memory set-spezifischen Verteilung sind. Die Elimination der Ausreißerwerte ändert generell wenig an den Regressionskoeffizienten, treibt aber die lineare Korrelation zwischen der Reaktionszeit, die auf eine msec genau gemessen wurde, und der Größe des memory set in einigen Fällen drastisch in die Höhe. Für jeden Pb ist aufgrund der statistischen Analysen auszuschließen, daß auch eine quadratische Trendkomponente zur Beschreibung des Zusammenhangs notwendig ist.

Inspiziert man die individuellen Regressionsgleichungen der Pbn, so fällt bei den Zahlen auf, daß der Regressionskoeffizient für die «*Falsch*»-Antworten tendenziell kleiner als für die «*Richtig*»-Antworten ist; dies tritt bei den Buchstaben nicht auf. Allerdings sind die Unterschiede bis auf einen Fall insignifikant ($\alpha = 0{,}05$), so daß wir für jeden Pb eine mittlere Regressionsgleichung erstellt haben. Für den Rechenkünstler lautet diese (Angaben in msec):

Zahlen: Zeit $= 333{,}85 + 27{,}09$ G
Buchstaben: Zeit $= 371{,}71 + 45{,}80$ G

Die mittlere Regressionsgleichung für die anderen Pbn (ohne Berücksichtigung des Rechenkünstlers) lautet:

Zahlen: Zeit $= 506{,}44 + 50{,}68$ G
Buchstaben: Zeit $= 453{,}18 + 41{,}54$ G

G ist jeweils die Größe des memory set. Was sich im Vergleich der Gleichungen für den Rechenkünstler mit den Durchschnittswerten der anderen Pbn andeutet, gilt auch für den Vergleich mit anderen individuellen Regressionsgleichungen. Für Zahlen hat der Rechenkünstler den geringsten Regressionskoeffizienten aller Pbn, während er für Konsonanten den zweithöchsten Regressionskoeffizienten aufweist. Der Regressionskoeffizient steht für die Prozeßrate. Bezüglich des Ordinatenabschnitts, der laut Sternberg (1966) bei der Annahme einer erschöpfenden seriellen Suche eine psychomotorische Konstante, eine Formation der Repräsentation des Testreizes und andere unbekannte Prozesse repräsentiert, gilt unabhängig vom Material, daß der Rechenkünstler, obwohl er nicht mehr Fehler als andere Pbn begeht, die niedrigsten Werte aufweist. Eindeutig verneint werden kann die Frage, ob der Regressionskoeffizient des Rechenkünstlers für Zahlen Null ist: Der Koeffizient ist statistisch bedeutsam, wobei, wie bei allen Tests, $\alpha = 0{,}05$ gesetzt wurde. Der Merkmalsvergleich findet aber schneller als bei anderen Pbn statt.

Um diese Ergebnisse näher interpretieren zu können, wurde ohne Berücksichtigung des Rechenkünstlers die Prozeßrate für Konsonanten mit der für Zahlen über die Individuen korreliert.

Die Produktmomentkorrelation beträgt 0,983, und

$b'_K = 4,86 + 0,72\ b_Z$

$b'_Z = -4,73 + 1,34\ b_K$

Erwartungsgemäß sollte der Ordinatenabschnitt Null sein (vgl. Gleichung [2]), was hier mit sehr guter Annäherung zutrifft. Die Regressionskoeffizienten müssen im Rahmen des Cavanagh-Ansatzes als Verhältnis der Gedächtnisspannen interpretiert werden; in diesem Falle wäre die Gedächtnisspanne unserer Pbn für Konsonanten als etwas größer als die für Zahlen zu erwarten. In der Literatur wird eine geringfügig höhere Gedächtnisspanne für Zahlen angegeben, wobei sich die Gedächtnisspanne für Buchstaben allerdings nur auf zwei Experimente bezieht (vgl. Cavanagh, 1972). In jedem Fall stimmen die Ergebnisse unseres Versuchs sehr gut mit der Prognose überein, die aus dem Cavanagh-Ansatz abgeleitet wurde.

Was für die Verminderung des Regressionskoeffizienten nach längerem Training im Sternberg-Pradigma verantwortlich sein könnte (vgl. Briggs & Blaha, 1969), soll hier nicht erörtert werden. Da diese Autoren aber bei einem memory set >1 die items simultan dargeboten haben, haben wir zum Vergleich ebenfalls ein Experiment 5c mit simultaner Darbietung aller items eines memory set vorgenommen. Auch hier gilt: Für Zahlen sind der Ordinatenabschnitt und Regressionskoeffizient des Rechenkünstlers niedriger als bei allen anderen Pbn. Für Buchstaben gilt: Der Regressionskoeffizient des Rechenkünstlers ist größer als bei Zahlen (46, 85 vs. 32, 24). Manche Personen dieses Experiments waren auch mit der sukzessiven Darbietung getestet worden (Experiment 5a). Bei simultaner Darbietung sind die Regressionskoeffizienten leicht höher. Die Regressionskoeffizienten beider Untersuchungen korrelieren mit 0.99, so daß wir von stabilen Schätzungen der Prozeßraten ausgehen können. Der vorexperimentelle Übungsvorsprung des Rechenkünstlers wirkt sich unabhängig von der Darbietungsform aus.

4.3 Gedächtnisspanne

Die Gedächtnisspanne des Rechenkünstlers wurde umfangreich untersucht. In einer ersten Sitzung wurde sie für dekadische Ziffern 0-9 überprüft. Die Ziffern wurden jeweils eine Sekunde lang auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage dargeboten. Vor der Darbietung der ersten Ziffer erschien jeweils das Wort «Achtung», nach der letzten Ziffer das Wort «Ende». Um das Entstehen proaktiver Hemmung zu minimieren, wurde mit 10 Ziffern begonnen, danach auf 20 erhöht. Falls dieser Wert nicht geschafft wurde, wurde eine Reihe mit 15 Zahlen dargeboten. Bei Erfolg sollte die Zahlenreihe jeweils um eine Zahl erhöht werden, bis zwei aufeinanderfolgende Reihen nicht mehr richtig reproduziert wurden. Bei Mißerfolg sollte mit einer aus 11 Zahlen bestehenden Reihe solange fortgefahren werden, bis zwei aufeinanderfolgende Reihen nicht mehr reproduziert werden konnten.

Dem Gedächtnisspannenversuch für Zahlen folgte einer für Buchstaben. Danach fanden an aufeinanderfolgenden Tagen Gedächtnisspannenversuche mit Zahlen aus dem Bereich 0–3; 0–7; 0–15; 0–31; 0–63; 0–127; 0–255; 0–511 und 0–1023 statt. Jede Zahl (z.B. aus dem ersten Bereich die «1» und aus dem letzten Bereich die «1012») wurde eine Sekunde lange dargeboten (!). Die Zahlen, die vom Bereich 0–15 an aus verschiedenen Ziffernmengen bestanden, sollten in der richtigen Reihenfolge reproduziert und anschließend als binäre Zahlen dargestellt werden. Damit sollte dem Pb eine bestimmte Einheitenbildung «aufgezwungen» werden. Postexperimentelle Befragungen ergaben, daß eine Einheitenbildung gegen dieses induzierte Vorgehen nicht möglich war. In den vorexperimentellen Gesprächen war erkundet worden, daß eine Übersetzung von dekadischen in binäre Zahlen und umgekehrt leicht möglich sei.

Innerhalb jedes Bereiches wurde folgende Variation vorgenommen, die anhand des Bereiches 0–3 erläutert sei. Begonnen wurde mit 5 derartigen Zahlen, z.B. 32210, die zu reproduzieren und in binäre Zahlen zu übersetzen waren. Dann folgten 12 binäre Zahlen, die als 6 Zahlen zwischen 0 und 3 (Reproduktion 1) und anschließend binär zu reproduzieren (Reproduktion 2) waren. Jede binäre Ziffer wurde eine Sekunde lang dargeboten. Die Vorgehensweise sollte wiederum eine bestimmte Einheitenbildung sicherstellen. Erst später werden wir darauf eingehen, inwieweit das gelungen ist.

Abgebrochen wurde der Versuch, wenn zwei aufeinander folgende Reihen nicht mehr richtig reproduziert wurden. Nehmen wir an, die Reihe

32210 werde noch reproduziert, nicht aber mehr die Reihen 101101100100 und 2101201. Das heißt, daß 5 Ziffern noch, 7 nicht mehr reproduziert wurden. Als Gedächtnisspanne wird der Mittelwert zwischen beiden Werten berechnet. Genauso wird bei der Ermittlung der Spanne für die binären Zahlen verfahren. Für die Bereiche 0–15 und folgende bezog die Ermittlung der Gedächtnisspanne noch eine weitere Korrektur ein. Nehmen wir an, der letzte erfolgreiche Versuch aus dem Bereich 0–15 bestand aus der Reproduktion der Zahlen 10 11 8 4 7. Das sind 5 (nominale) chunks und 7 Ziffern. Die Gedächtnisspanne beträgt nach dem eben erläuterten Verfahren 6 chunks. Der ergänzte chunk besteht mit der Wahrscheinlichkeit von 10/16 aus einer Ziffer, mit der Wahrscheinlichkeit von 6/16 aus 2 Ziffern. Er hat eine erwartete Größe von $10/16\times 1+6/16\times 2=22/16=1{,}375$, so daß die nach Ziffern bemessene Gedächtnisspanne $S=7+1{,}375=8{,}375$ ist. Da sie auch $C=6$ chunks beträgt, ist der durchschnittliche Umfang der chunks $U=8{,}375/6=1{,}40$.

In den Abschlußsitzungen fand noch einmal ein Versuch mit dekadischen Zahlen 0–9 und den Buchstaben statt. Die Gedächtnisspanne für Zahlen hatte sich geringfügig um 2 auf 20, die für Buchstaben um 3 auf 10 erhöht. Wenn überhaupt ein Lernen stattgefunden hat, dann war es gering. Der Wert für die dekadischen Zahlen geht in Tabelle 5 als Durchschnittswert 19 ein. Die Angabe für C zu diesem Wert wie auch für den Bereich 0–7 entspricht der postexperimentellen Angabe des Pb[1]. Alle anderen Werte für C sind die um 1 erhöhten Zahlen, die reproduziert wurden. Die Werte für S beziehen sich auf Ziffern, und $U=S/C$. Der Bereich 0–3 ist nicht berücksichtigt worden, da der Pb an diesem Tag indisponiert war und ungewöhnlich schlechte Leistungen zeigte. Tabelle 5 bezieht sich auf die nicht-binäre Darbietung der Zahlen.

Tabelle 5: Ergebnisse aus dem Gedächtnisspannenversuch.

Zahlenbereiche	S	U	C
0– 9	19	3	6,33
0– 7	20	3	6,67
0– 15	15,38	1,54	10
0– 31	14,69	1,84	8
0– 63	15,84	1,98	8
0– 127	22,14	2,21	10
0– 255	16,57	2,76	6
0– 511	16,79	2,80	6
0–1023	17,92	2,99	6

1 Die Angaben bezogen sich auf U.

Wenn wir von einer nach Ziffern (nicht nach chunks) begrenzten Spanne ausgehen, sollte gelten, daß $U_i = \frac{S}{C_i}$ ist, wobei i der Laufindex für die Bereiche ist. Als am besten passende Regressionslinie ergibt sich: $U_i=17{,}65/C_i$, wobei U_i und $1/C_i$ mit 0,86 korrelieren. Da der Ordinatenabschnitt der Geraden Null ist, kann 17,65 als Maß für die Gedächtnisspanne des Pb interpretiert werden, unabhängig von der Art der Zahlen. Dieses Ergebnis bekräftigt die Vermutung, daß die Gedächtnisspanne nicht nach chunks bemessen, sondern bzgl. der Ziffern konstant ist. Unter der Hypothese einer nach chunks bemessener konstanten Gedächtnisspanne wäre zu erwarten, daß $S_i=CU_i$ ist. U_i und S_i korrelieren aber nur mit 0,47, und der Ordinatenabschnitt und Regressionskoeffizient der am besten passenden Geraden nehmen mit 12,67 bzw. 2 Werte an, die weit von den theoretischen Erwartungen abweichen. Bemerkenswert erscheint, daß sich die nach Ziffern bemessene Konstanz der Gedächtnisspanne ergibt, obwohl die Darbietungszeiten je Ziffer (aber nicht je Zahl) variierten. Dies bekräftigt die Vermutung, daß die von uns induzierten chunks die funktional wirksamen waren.

Mit der Schätzung $S=17{,}65$ stimmen andere Schätzungen und Prognosen zu diesem Versuch sehr gut überein. Wie oben dargestellt, wurden auch binäre Ziffern dargeboten, die als Zahlen (Reproduktion 1) bzw. als binäre Ziffern (Reproduktion 2) wiederzugeben waren. Interessant ist die Vorgehensweise des Pb, die ihm freigestellt war. Er gruppierte jeweils drei binäre Ziffern zu einer Zahl von 0–7 und drei derartige Zahlen zu einer Gruppe. Diese Zahlen (Codes) von 0–7 wurden zuerst schriftlich reproduziert und dann in binäre Ziffern übersetzt (Reproduktion 2). Aus den binären Ziffernfolgen ließen sich dann die gewünschten Zahlen (Reproduktion 1) gewinnen. Die Gedächtnisspanne für die Codes beträgt im Durchschnitt 17,67 (mittleres Abweichungsquadrat 5,08). Beide Schätzungen für die Gedächtnisspanne liegen sehr nahe beeinander.

Das Vorgehen des Pb macht deutlich, daß bei der Darbietung binärer Ziffern die nominalen chunks nicht die funktional wirksamen waren. Hier konnte eine Strategie verfolgt werden, die es dem Pb ermöglichte, trotzdem die nominalen chunks zu reproduzieren. Wie hat sich nun das Vorgehen des Pb auf die Reproduktion 1 und 2 ausgewirkt? Wohl gemerkt handelt es sich hier eigentlich nicht mehr um Gedächtnisspannen, da Gedächtnisfehler nach den schriftlichen Reproduktionen der Codes nicht mehr auftreten konnten. Diese waren nur noch in binäre Ziffernfolgen oder nominale chunks zu *übersetzen.* Aufgrund der oben mitgeteilten Ergebnisse sollte erwartet werden, daß 17,65 Ziffern (Reproduktion 1) wiedergegeben werden können. Der tatsächliche Wert beträgt 17,58 (mittleres Abweichungsquadrat 5,38). Da jeder Code 3 binäre Ziffern umfaßt, sollten $3 \times 17{,}65 = 52{,}95$ binäre Ziffern in der korrekten Reihenfolge reproduziert werden können (Reproduktion 2). Der tatsächliche Wert beträgt 52,17 ($\sigma^2 = 38{,}14$).

4.4 Interpretation der Ergebnisse

Die Gedächtnisspanne von 17–18 Ziffern kann nicht auf eine erweiterte Kurzzeitgedächtniskapazität zurückgeführt werden, da die Gedächtnisspanne für Buchstaben weit geringer ist. Was also liegt hier vor?

Zunächst einmal zeigt sich bei den Zahlen, daß unabhängig von der Größe der chunks eine konstant große Ziffernmenge reproduziert werden kann. Das bekräftigt die Vermutung, daß die Gedächtnisspanne nicht nach chunks bemessen konstant ist (vgl. auch Schweikert & Boruff, 1986). Dieser Befund ist eine Voraussetzung dafür, daß die erörterte Hypothese einer begrenzten Zeitspanne für die Persistenz der Gedächtnisspur zutreffen kann.

Bestätigt sich diese Hypothese an dem Rechenkünstler? Berechnet man für ihn die Konstante C (vgl. Gleichung [1]) aus nun vorhandenen Informationen über b und S, erhält man für Zahlen einen Wert von 478 msec, für Buchstaben einen von 389 msec. Da für die anderen Pbn b_K etwas geringer ist als für den Rechenkünstler, dessen Gedächtnisspanne für Buchstaben 8.5 beträgt, läßt sich bei Gültigkeit des Cavanagh-Ansatzes ihre Gedächtnisspanne für Buchstaben auf etwa 9 schätzen. Diese Schätzung führt bei Buchstaben zu einer Schätzung für C von etwa 374 msec. Da außerdem $b_Z = gb_K$ gilt, können wir die Gedächtnisspanne der Vergleichspersonen für Zahlen auf etwa 7 schätzen, was zu einer Schätzung für C von etwa 355 msec führt. Gegenüber diesem Wert sind 478 msec groß, viel größer auch als die bei Cavanagh (1972) und Puckett & Kausler (1984) angegebenen Werte. Offenbar liegt hier eine zeitliche Ausdehnung der Komponente des Arbeitsspeichers vor, die durch das Sternberg-Paradigma erfaßt wird. Da die Gedächtnisspanne zugleich aber auch gleich der Memorierrate multipliziert mit der Zerfallsrate des Kurzzeitspeichers sein soll (Schweikert & Boruff, 1986), ist anzunehmen, daß die Dauerhaftigkeit, wenn die Memorierrate als interindividuell relativ konstant angesehen werden kann, auch dieser Komponente des Arbeitspeichers bei dem Rechenkünstler größer ist. Danach wirken sich Erfahrungen im Bereich des Rechnens materialspezifisch auf die Dauerhaftigkeit der Gedächtnisspuren aus, was andererseits wiederum positive Auswirkungen auf die Bewältigung schwieriger Rechenaufgaben haben sollte, die das Arbeitsgedächtnis belasten.

5. Symbolische Distanzeffekte

Für die Zahlen 1 bis 9 besagt der symbolische Distanzeffekt (zusammenfassend: Moyer & Dumais, 1978), daß die Entscheidung, welche von zwei Zahlen die größere ist, um so weniger Zeit beansprucht, je größer die Distanz zwischen ihnen ist. Aus der Psychologie der Gedächtnisentwicklung (z.B. Sekuler & Mierkiewicz, 1977) ist weiter bekannt, daß die benötigte Antwortzeit linear mit der Distanz fällt, wobei für den Ordinatenabschnitt und die Steigung gilt, daß beide mit zunehmendem Alter kleiner werden. Interpretiert wird dieser Befund u.a. mit der Annahme einer analogen Repräsentation, von der auch Restle (1970) ausgegangen ist, um die Ergebnisse seiner Untersuchungen zu einfachen Additionsaufgaben zu interpretieren. Nach dieser Annahme weisen die analogen Responses zu Zahlen Verteilungen auf, die sich mehr oder minder überlappen können. Je mehr sie sich überlappen, desto geringer ist die effektive Distanz zwischen den Zahlen. Je geringer diese Distanz ist, desto länger sollte die Entscheidungszeit dauern. Im Rahmen dieser Hypothese wäre dann der Befund von Sekuler & Mierkiewicz (1977) auf eine Vergrößerung der effektiven Distanz zwischen den Verteilungen der analogen Responses mit dem Alter zurückzuführen. Die effektive Distanz ist ein Maß für den Abstand zweier Erwartungswerte relativ zur Streuung.

Diese Interpretation ist allerdings umstritten. Für den Vergleich großer Zahlen (z.B. 4173 vs. 3173) spielt die Art der Interpretation für den symbolischen Distanzeffekt keine Rolle. Hier findet offenbar ein sukzessiver Größenvergleich der Ziffern von links nach rechts statt (vgl. Poltrock & Schwartz, 1984). Bei obigem Zahlenpaar könnte der Prozeß schon bei dem ersten Zahlenpaar abbrechen, was implizieren würde, daß 4173 mit 3173 genauso schnell verglichen wird wie mit 3769. Dies bestätigt sich in den Untersuchungen von Poltrock & Schwartz (1984). Der symbolische Distanzeffekt gilt also nicht für größere Zahlen, bleibt für deren Vergleich allerdings eine bedeutsame Einflußgröße.

Miller, Perlmutter & Keating (1984) haben gezeigt, daß die Zeiten beim Vergleich einfacher Ziffern beträchtliche Korrelationen mit der Geschwindigkeit der Produktion von Lösungen einfacher Additions- und Multiplikationsaufgaben aufweisen. Derartige Berechnungen müssen auch bei der Lösung komplexer Probleme durchgeführt werden (vgl. Bredenkamp, 1989). In Experiment 7a interessierte, ob der Vergleich einzelner Ziffern dem Rechenkünstler schneller möglich ist als anderen Pbn. Ließe sich dies zeigen, so wäre eine weitere Komponente identifiziert, die den Rechenkünstler beim Rechnen in einen Vorteil bringt: Schnelleres Vergleichen ermöglicht schnelleres Rechnen und damit eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses, dessen zeitliche Persistenz zwar größer als bei anderen Pbn, aber eben doch begrenzt ist. Außerdem interessierte, ob der symbolische Distanzeffekt für Zahlen auch bei dem Rechenkünstler auftritt. Da zunehmende Erfahrung mit Zahlen den Ordinatenabschnitt und die Steigung reduziert, wurde es für möglich gehalten, daß – im Rahmen der Hypothese einer analogen Repräsentation betrachtet – die Verteilungen soweit auseinander liegen, daß es zu keiner Überlappung kommt. Als Resultat sollte sich dann ein Regressionskoeffizient = 0 ergeben. Verglichen wurden die Zeiten des Rechenkünstlers mit denen anderer Pbn. Außerdem wurde ein Experiment 7b mit Konsonanten, für die ebenfalls der symbolische Distanzeffekt dokumentiert ist (Lovelace & Snodgrass, 1971), durchgeführt, um das Zahlenwissen mit dem Buchstabenwissen vergleichen zu können.

Die Experimente wurden folgendermaßen durchgeführt. In Experiment 7a erschien ein Ziffernpaar auf dem Monitor einer Versuchssteueranlage, und der Pb hatte möglichst schnell zu entscheiden, welche der Ziffern (1 bis 9) die größere sei. Befand sie sich rechts, war eine rechte Taste zu drücken; andernfalls war die linke Taste zu drücken. Die benötigte Zeit wurde auf eine msec genau gemessen. Die Distanzen (D) 1 bis 8 waren je 16mal in randomisierter Folge vertreten. In der Hälfte aller Fälle befand sich für jede Distanz die größere Zahl auf der linken Seite. Genauso war das Experiment 7b angelegt. Zu entscheiden war hier, ob der weiter vorn im Alphabet stehende Buchstabe sich links oder rechts befand.

Für jeden einzelnen Pb wurde der symbolische Distanzeffekt nachgewiesen. Er tritt also in Experiment 7a auch für den Rechenkünstler auf. In der ersten Hälfte des Versuchs lautet die Regressionsgleichung für ihn (Angaben in msec):
Zeit = 431,33 - 10,19 D; in der zweiten Hälfte lautet sie
Zeit = 382,41 - 5,62 D. Hier ist also ein Übungseffekt festzustellen, der auch für jeden anderen Pb zutrifft. Die durchschnittlichen Regressionsgleichungen der anderen Pbn lauten für die erste Hälfte:
Zeit = 555,91 - 13,36 D, und für die 2. Hälfte:
Zeit = 498,5 - 9,27 D. Was sich beim Vergleich der genannten Regressionsgleichungen andeutet, wird durch den Vergleich der individuellen Regressionsgleichungen bestätigt: Ordinatenabschnitt und Regressionskoeffizient des Rechenkünstlers sind geringer als die jedes anderen Pb. Sein Übungsgewinn entspricht dem durchschnittlichen Gewinn. Sein Vorsprung schon in der ersten Versuchshälfte gegenüber den anderen Pb dürfte auf die intensivere vorexperimentelle Erfahrung mit Zahlen zurückzuführen sein. Dieser Vorsprung sollte aber nicht für Buchstaben gelten, was Experiment 7b bestätigt. Die Regressionsgleichungen des Rechenkünstlers für die erste und zweite Versuchshälfte lauten: Zeit = 1350,56 - 38,37 D bzw. 1685,08 -91,47 D; die der anderen Pbn lauten: 1360,25 - 44,95 D bzw. 1558,72 - 71,40 D. Ein Übungsfortschritt bei den Buchstaben war generell nicht festzustellen.

Wenn für Zahlen von der Annahme einer analogen Repräsentation ausgegangen wird, sollten die fehlerhaften Antworten, die bei der Erstellung der Regressionsgleichungen ausgeschlossen waren, um so häufiger auftreten, je kleiner die Distanz ist. Da je Pb wenig Fehler auftreten, wurden diese über die Pbn addiert. Für die Distanzen 1 bis 8 betragen die Fehlerhäufigkeiten 11; 5; 2; 2; 1; 0; 1; 1. Dieses Ergebnis entspricht der Repräsentationsannahme. Tendenziell, aber nicht so deutlich, trat dieses Ergebnis auch für die Buchstaben auf.

Im Rahmen der Hypothese einer analogen Repräsentation von Zahlen interpretiert, sprechen die Ergebnisse für eine größere effektive Distanz zwischen ihnen bei dem Rechenkünstler. Interessant ist, daß sich wie bei Sekuler & Mierkiewicz (1977) gezeigt hat, daß die Erfahrung mit Ziffern die Geschwindigkeit ihrer Unterscheidung günstig beeinflußt. Diese dürfte eine Basisoperation für mentale Berechnungen sein, die um so schneller ausgeführt werden können, je weniger zeitaufwendig die Unterscheidung von Zahlen ist. Wie allerdings das Zusammenspiel zwischen mentaler Repräsentation und mentalem Rechnen genauer zu beschreiben ist, dürfte z.Z. ungeklärt sein (vgl. Restle, 1970; Ashcraft & Stazyk, 1981).

6. Abschließende Bemerkungen

Wir gehen davon aus, daß der Kurzzeitspeicher nicht nur das Erinnern einer Anzahl von items ermöglicht, sondern ein System ist, das an der Bewältigung verschiedener kognitiver Aufgaben beteiligt ist (Arbeitsgedächtnis). Aufgrund unserer Ergebnisse ist auf dem Hintergrund bestimmter Hypothesen aus der allgemeinen Gedächtnispsychologie zu vermuten, daß langjährige Erfahrungen die zeitliche Kapazität verschiedener Komponenten des Arbeitsgedächtnisses materialspezifisch erhöhen. Auf mentales Rechnen bezogen würde dies bedeuten, daß die gerade bearbeiteten Zahlen für Zwischenrechnungen länger als bei Personen ohne derartige Erfahrungen präsent gehalten werden können. Da Rechenerfahrungen weiterhin die Unterscheidbarkeit von Ziffern günstig beeinflussen, die ihrerseits die Geschwindigkeit der Produktion von Aufgabenlösungen determinieren, ergibt sich daraus ein weiterer Vorteil von Rechenkünstlern. Bemerkenswert erscheint, daß dieser nicht nur auf die Anwendung bestimmter Regeln, über die die meisten anderen Menschen nicht verfügen und die nicht Gegenstand dieses Artikels waren (vgl. dazu Bredenkamp, 1989), zurückzuführen ist; er läßt sich bereits an den Basiskomponenten und damit an einer Stelle der Informationsverarbeitung identifizieren, wo Vergleiche mit anderen Personen möglich sind.

Trotz der aufgewiesenen Unterschiede zwischen G.M. und anderen Pbn meinen wir nicht, daß die Ergebnisse eine spezielle Gedächtnispsychologie von Rechenkünstlern nahe legen. Die Ergebnisse wurden auf dem Hintergrund allgemeinpsychologischer Hypothesen aus dem Bereich der Gedächtnispsychologie interpretiert, die – entgegen manchen anders lautenden Aussagen – Raum für interindividuelle Unterschiede lassen. Wie unsere ersten beiden Untersuchungen zeigen, werden manche dieser Hypothesen für bestimmte Lernmaterialien erst prüfbar, wenn Pbn zur Verfügung stehen, die über das erforderliche Wissen verfügen. Insofern sind diese Untersuchungen auch als ein allgemeinpsychologischer Beitrag zu sehen, der die Beschränkung auf sprachliches Material überwindet.

Literatur

Anderson, J. R.: Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review* 1982, *89*, 369-406.

Ashcraft, M. H. & Stazyk, E. H.: Mental addition: A test of three verification models. *Memory & Cognition* 1981, *9*, 185-196.

Bjork, R. A.: Theoretical implications of directed forgetting. In: A. W. Melton & E. Martin (eds.): *Coding processes in human memory.* Washington: Winston 1972.

Bredenkamp, J.: *Kognitionspsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers.* In: H. Feger (ed.): Wissenschaft und Verantwortung. Göttingen: Hogrefe 1989.

Briggs, G. E. & Blaha, J.: Memory retrieval and central comparison times in information processing. *Journal of Experimental Psychology* 1969, *79*, 395-402.

Cavanagh, J. P.: Relation between the immediate memory span and the memory search rate. *Psychological Review* 1972, *79*, 525-530.

Chase, W. G. & Ericsson, K. A.: Skill and working memory. In: G. H. Bower (ed.): *The Psychology of Learning and Motivation, Band 16.* New York: Academic Press 1982.

Craik, F. I. M. & Watkins, M. J.: The role of rehearsal in short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 1973, *12*, 599-607.

Elliott, P. B.: Tables of d'. In: J. A. Swets (ed.): *Signal detection and recognition by human observers.* New York: Wiley 1964.

Hunt, E. & Love, T.: How good can memory be? In: A. W. Melton & E. Martin (eds.): *Coding processes in memory.* Washington: Winston, 1972.

Hunter, I. M. L.: An exceptional memory. *British Journal of Psychology* 1977, *68*, 155-164.

Lovelace, E. A. & Snodgrass, R. D.: Decision times for alphabetic order of letter pairs. *Journal of Experimental Psychology* 1971, *88*, 258-264.

Luce, R. D.: *Response times. Their role in inferring elementary mental organization.* New York: Oxford University Press 1986.

Massaro, D. W.: *Experimental Psychology and Information processing.* Chicago: Rand McNally 1975.

Miller, K.; Perlmutter, M. & Keating, D.: Cognitive Arithmetic: Comparison of Operations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 1984, *10,* 46-60.

Moyer, R. S. & Dumais, S. T.: Mental comparisons. In: G. H. Bower (ed.): *The Psychology of Learning and Motivation, Band 12.* New York: Academic Press 1978.

Poltrock, S. E. & Schwartz, D. R.: Comparative judgement of multidigit numbers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 1984, *10,* 32-45.

Puckett, J. M. & Kausler, D. H.: Individual differences and models of memory span: A role for memory search rate? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 1984, *10,* 72-82.

Restle, R.: Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology* 1970, *83,* 274-278.

Schweikert, R. & Boruff, S.: Short-term memory capacity: Magic number or magic spell? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 1986, *12,* 419-425.

Sekuler, R. & Mierkiewicz, D.: Children's judgements of numerical inequality. *Child Development* 1977, *48,* 630-633.

Shimizu, H.: The relationship between memory performance and the number of rehearsals in Free Recall. *Memory & Cognition* 1987, *15,* 141-147.

Smith, S. B.: *The great mental calculators.* New York: Columbia University Press 1983.

Sternberg, S.: High speed scanning in human memory. *Science* 1966, *153,* 652-654.

Stigler, J. W.; Lee, S. Y. & Stevenson, H. W.: Digit span in Chinese and English: Evidence for a temporally limited store. *Cognition* 1986, *23,* 1-20.

Tukey, J. W.: *Exploratory Data Analysis.* Reading, Mass.: Addison-Wesley 1977[2].

Waugh, N. C. & Norman, D. A.: Primary Memory. *Psychological Review* 1965, *72,* 89-104.

Prof. Dr. Jürgen Bredenkamp, Psychologisches Institut der Universität, Römerstraße 164, 53 Bonn 1

Sonderdruck aus

Sprache & Kognition

Zeitschrift für Sprach- und Kognitionspsychologie und ihre Grenzgebiete

Verlag Hans Huber Bern Stuttgart Toronto